



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

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**DESARROLLO DE UN MÉTODO INTEGRAL PARA EL ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN
ROCA-SUELO-AGUA- PLANTA EN AMBIENTES SALINOS**

Tesis que presenta

Erika Loyola Martínez

Para obtener el grado de

Doctor(a) en Geociencias Aplicadas

Director (Codirectores) de la Tesis:

Dr. José Alfredo Ramos Leal

Dra. Janete Moran Ramírez

San Luis Potosí, S.L.P., mayo 26 de 2025

Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**DESARROLLO DE UN MÉTODO INTEGRAL PARA EL ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN ROCA-SUELO-AGUA- PLANTA EN AMBIENTES SALINOS**” presentada para obtener el Grado de Doctor(a) en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Erika Loyola Martínez** y aprobada el **día 26 de mayo de 2025** 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

Dra. Janete Moran Ramírez

Director/Codirectores de la tesis

Dr. Ulises Rodríguez Robles

Miembro del Comité Tutorial

Dra. Berenice Zapata Norberto

Miembro del Comité Tutorial

Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de Petrografía del Instituto de Geología de la UASLP, Laboratorio de Geofísica de la División de Geociencias Aplicadas y del Laboratorio LINAN del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. José Alfredo Ramos Leal y de la Dra. Janete Moran Ramírez

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología No. de 519116 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.

Dedicatorias

A mis padres Rodolfo Loyola Hernández que me dieron la vida, especialmente a mi madre *Martha Martínez Hernández* porque sin su apoyo y confianza nada de esto lo hubiera logrado, por ser mi mayor ejemplo de esfuerzo y retos logrados *MIL GRACIAS.*

A mi hermana *Yuliana* y su pequeña familia *Alejandro, Santi* y la pequeña *Xaria* por ser la compañía de esta aventura *gracias* sin olvidar a mis tíos que aún no entienden que hago siempre estuvieron pendientes de ayudarme en lo que necesitara o palabras de aliento *Abel* y *Antonio* y a quien he perdido en este periodo.

A *Piña* y mi pequeño *Manchitas* por ser mis amigos, compañeros y guardianes en esta aventura de trabajo de campo, desveladas, tristezas, enojos y principalmente por ser el motivo de sonrisas diarias *gracias.*

A mis amigos de años que pese a la distancia sus porras, palabras de aliento, asesorías fueron muy importantes para mi *Gio* y *Tere* *gracias.*

Agradecimientos

A mis asesores *Dr. José Alfredo Ramos Leal* por compartir su conocimiento, apoyo y acompañamiento en este proyecto, a la *Dra. Janete Moran Ramírez* por todo su apoyo, paciencia, consejos y palabras de aliento cuando más lo necesite gracias, al *Dr. Ulises Rodríguez Robles* por aceptar ser mi asesor, por permitirme tener la mejor estancia, a la *Dra. Berenice Zapata Norberto* por ser paciente y tener disposición de ayuda siempre.

Un especial agradecimiento al *Dr. José Rafael Barboza Gudiño* del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por el patrocinio, préstamo del laboratorio y asesoría para la toma y realización petrográfica.

A mis *compañeros* de generación, de diferentes divisiones y generaciones que hicieron de este día a día toda una aventura de mundos, no mencionaré nombres para no olvidar alguno, pero *gracias*.

Al *CONACYT* por la beca otorgada durante este proyecto de investigación.

Al *Instituto de Geología de la UASLP* por facilitarme sus laboratorios, equipo, asesoría en cada momento necesitado.

Al *IPICYT* por permitirme la oportunidad de ser parte de su institución con el objetivo de aprender más en su División de Geociencias Aplicadas.

Al *CU Costa Sur - UDG* por su apoyo en el análisis de isótopos ambientales y aceptarme en la corta estancia en su institución.

Contenido

“DESARROLLO DE UN MÉTODO INTEGRAL PARA EL ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN ROCA-SUELO-AGUA- PLANTA EN AMBIENTES SALINOS”

Constancia de aprobación de la tesis	2
Créditos institucionales	3
Acta de examen	4
Dedicatorias	5
Agradecimientos	6
Lista de tablas	8
Lista de figuras	9
Abreviaturas	11
Resumen	12
Abstract	13
Introducción	15
Capítulo I Objetivos	15
Capítulo II Área de estudio	20
Capítulo III Marco Teórico	31
Capítulo IV Metodología	47
Capítulo V Resultados	62
Capítulo VI Recomendaciones	95
Conclusión	98
Referencias	98
Anexos I	107
Anexos II	118

Lista de tablas

1. Tabla 5.3	70
2. Tabla 5.4	70
3. Tabla 5.5	72
4. Tabla 5.6	75
5. Tabla 5.7	84
6. Tabla 5.8	89

Lista de figuras

1. Figura 2.1	21
2. Figura 2.2	24
3. Figura 2.3	25
4. Figura 2. 4	27
5. Figura 5	63
6. Figura 5.1	64
7. Figura 5.2	65
8. Figura 5.3	66
9. Figura 5.4	67
10. Figura 5.5	69
11. Figura 5.6	71
12. Figura 5.7	73
13. Figura 5.8	77
14. Figura 5.9	79
15. Figura 5.10	80
16. Figura 5.11	82
17. Figura 5.12	83
18. Figura 5.13	85
19. Figura 5.14	86
20. Figura 5.15	90
21. Figura 5.16	92

Anexos

1. Artículo	107
2. Testigos de trabajo SIG	130
3. Testigos Petrografía	132
4. Testigos Difracción de Rayos X	136
5. Testigos Textura de Suelos	136
6. Testigos Hidrogeoquímica	138
7. Testigos Índice de Clorofila	140

Abreviaturas

SIG.	Sistemas de Información Geográfica
NDVI.	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
MDE.	Modelo Digital de Elevación
REPDA	Registro Público de Derechos del Agua
NOM-127	Norma Mexicana 127
EPA	Agencia de Protección Ambiental siglas en inglés
pH	Potencial de Hidrógeno
CMD	Conductividad magnética o electromagnética
Qz	Cuarzo
Fk	Feldespató cálcico
Plg	Plagioclasa
Na	Sodio
Ca	Calcio
Mg	Magnesio
HCO₃	Bicarbonato
GWL	Línea Meteórica Mundial
Alk	Alcalinidad
EC	Conductividad Eléctrica
OD	Oxígeno Disuelto
STD	Sólidos Totales Disueltos
CI	Índice de Clorofila
Huizache	<i>Acacia farnesiana</i>
Mezquite	<i>Prosopis spp</i>
IRMS	Espectrometría de masa de relación isotópica
MEB	microscopio electrónico de barrido
DOF	Diario Oficial de la Federación
CVSLP	Complejo Volcánico de San Luis Potosí
CVSMR	Complejo Volcánico de Santa María del Río
ORP	Potencial de Oxido - reducción
Qhoal	Aluvión
TomA	Andesita

ToRP	Riolita Porfídica
ToDa	Dacita
ToR	Riolita
ToTn	Tonalita

Resumen

“DESARROLLO DE UN MÉTODO INTEGRAL PARA EL ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN ROCA-SUELO-AGUA- PLANTA EN AMBIENTES SALINOS”

La metodología consistió en análisis previo con **Percepción remota** en imágenes satelitales Landsat 8 del municipio de Tierra Nueva en un periodo de 2 décadas, la **Petrografía** en observación de 5 muestras de campo y posterior análisis en microscopio de riolitas, dacitas y riolitas porfíricas, **Isótopos ambientales** de agua en Deuterio y Oxígeno-18, **Hidrogeoquímica** de agua en pozos, norias, galerías y en el río principal, **Difracción de rayos X** en el análisis de 15 muestras de sedimento, arenas, rocas con análisis mineralógico de abundancia, se pretende observar si las propiedades del suelo tienden a influir en el desarrollo de las plantas terrestres, serán las que determinen la calidad de disponibilidad de agua, nutrientes, o su interacción agua-roca en el crecimiento de la vegetación y su densidad poblacional.

En este trabajo se analizan diversos elementos del medio ambiente (rocas, suelo, agua, etc.) que inciden en los procesos de aclimatación fisiológica de *Vachellia farnesiana* (huizache) y *Prosopis spp.* (mezquite) como parte de sus mecanismos de adaptación y resiliencia frente a condiciones propias de climas áridos y suelos salinos.

PALABRAS CLAVE. salinidad, muerte regresiva, rocas ígneas, isótopos ambientales, hidrogeoquímica, Tierra Nueva.

Abstract

“DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED METHOD FOR THE STUDY OF ROCK-SOIL-WATER-PLANT INTERACTION IN SALINE ENVIRONMENTS”.

The methodology consisted of previous analysis with Remote Sensing in Landsat 8 satellite images of the municipality of Tierra Nueva in a period of 2 decades, Petrography in observation of 5 field samples and subsequent microscopic analysis of rhyolites, dacites and porphyritic rhyolites, Environmental isotopes of water in Deuterium and Oxygen-18, Hydrogeochemistry of water in wells, wells, galleries and in the main river, X-ray diffraction in the analysis of 15 samples of sediment, sands, rocks with mineralogical analysis of abundance, it is intended to observe if the soil properties tend to influence the development of terrestrial plants, will be those that determine the quality of water availability, nutrients, or their water-rock interaction in the growth of vegetation and its population density. This paper analyses various environmental elements (rocks, soil, water, etc.) that influence the physiological acclimatisation processes of *Vachellia farnesiana* (huizache) and *Prosopis spp.* (mesquite) as part of their adaptation and resilience mechanisms to conditions typical of arid climates and saline soils.

KEY WORDS. salinity, dieback, igneous rocks, environmental isotopes, hydrogeochemistry, Tierra Nueva.

Capítulo I.

1.1 Introducción

La salinización, es una de las causas más importantes en la desertificación y degradación del suelo, debido al aumento de la temperatura y al descenso de las precipitaciones registradas en los últimos años ([Soca, 2015](#)). El problema de la salinización es uno de los procesos de degradación del suelo más grave y extendido en todo el planeta ([Van Lynden *et al.*, 2004](#); [Machado, Serralheiro, 2017](#)).

Este fenómeno está asociado a las condiciones climáticas de aridez, así que la aridez se define como: zonas áridas aquellas regiones cuyo abasto de agua es deficiente, su precipitación y humedad atmosféricas suelen ofrecer valores muy por debajo del promedio mundial anual según [Rzedowski, \(1968\)](#) sin mencionar el ambiente geológico presente como el de materiales originales ricos en sodio como las rocas riolíticas ([Morán-Ramírez *et al.* 2024](#)), y al uso de aguas de mala calidad en suelos agrícolas ([Singh, 2020](#)). La salinización y sodicidad son los principales fenómenos responsables del deterioro de los suelos ([Pulido *et al.*, 2010](#)). La sodicidad, tiene su origen en la alteración de plagioclasas ([Bowen, 1928](#)), cuando los minerales cristalizan durante el enfriamiento del magma, la cristalización tiene dos rutas, la primera se denomina serie discontinua de los minerales ferromagnesianos, y la segunda continua de las plagioclasas, ambas convergen en un tronco común, en donde se produce la cristalización de feldespatos potásicos y finalmente cuarzo, que son los últimos en cristalizar. Al quedar la roca expuesta a la intemperie, los minerales de las rocas volcánicas

son intemperizados por la presencia de agua, la temperatura o la actividad de los organismos ([Hasenmuller et al., 2017](#)). El intemperismo puede ser clasificado en 6 rangos ([GSL, 1995](#)), la clasificación I indica roca fresca; II indica ligeramente alterada; III es moderadamente alterada; IV es altamente alterada; V es completamente alterada y VI cuando es suelo residual. Debido a que los minerales que componen las rocas se formaron a altas condiciones de presión y temperatura diferentes a las condiciones ambientales, esto favorece a su inestabilidad ([Colman, Steven, 1981](#); [Duzgoren-Aydin et al., 2022](#); [Colman, Steven, 1981](#)).

Los minerales que se forman a altas temperaturas y presiones son inestables en condiciones ambientales; mientras que, los minerales que se forman a temperaturas y presiones bajas son más estables ([Goldich, 1938](#)); este comportamiento es similar al patrón de las reacciones de [Bowen \(1928\)](#), en donde los minerales que son los primeros en cristalizar en altas temperaturas también son los primeros en meteorizarse químicamente ([Goldich, 1938](#)). Lo que implica que los minerales primarios (feldespatos y plagioclasas) son fácilmente intemperizables.

El intemperismo genera minerales arcillosos y óxidos de hierro que posteriormente se disgregan acumulándose en material fino, este mismo se incrementa cuando es mayor la interacción de las plantas ([Sedov, 2019](#)); porque el intemperismo de Hialoclastita se deriva del crecimiento de los cristales de sal inmersos en sus poros y el agua (humedad, lluvia, rocío, evaporación, etc.), juegan un papel importante ya que hidratan la roca, esta aumenta de volumen

por lo consiguiente los suelos se salinizan, el medio donde se desarrollan es el factor principal presente en zonas áridas semi áridas o semidesérticas.

Las rocas máficas y ultramáficas con alto contenido de minerales ferromagnesianas y calcio son inestables se alteran más rápido que las rocas félsicas ricas en sílice; es decir los minerales alcalinos tienen mayor dificultad para alterarse. Estas condiciones de alteración de minerales se manifiestan en la formación de suelos, de tal manera que en regiones con rocas máficas e intermedias la presencia de suelo es notable; mientras que, en regiones donde prevalecen las rocas félsicas el suelo es escaso; así que, el objetivo de este estudio es determinar el origen de la salinización de los suelos debido a la alteración de silicatos durante la interacción del agua-roca y su afectación con la vegetación típica de la zona.

1. 2 Objetivos

1. 2.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología integral que combine diversos métodos hidrogeoquímicos, difracción de rayos x, petrográficos para determinar el origen de la salinidad en agua, suelo y su repercusión en la vegetación contribuyendo a la comprensión y mejora de los ecosistemas afectados.

1. 2. 2 objetivos particulares

- + Realizar una caracterización hidrogeoquímica del agua.
- + obtener una caracterización fisicoquímica y textural del suelo.
- + Establecer los mecanismos de salinización por sodicidad en el área.

- + Determinar la geoquímica del suelo y roca por difracción de rayos X para la abundancia de minerales.
- + Identificar el impacto de la salinidad del agua y suelo en las plantas.
- + Evaluar el impacto de la salinidad del sistema en dos especies nativas Mezquite (*Prosopis spp.*) y Huizache (*Vachellia farnesiana*).

1. 3 Justificación

Gran parte del territorio mexicano se encuentra conformado por zonas semiáridas o áridas y drenaje deficiente que puede causar la concentración de sal en el suelo, y como consecuencia afecta sus propiedades químicas y físicas, perjudicando su uso de suelo ([Singh, 2019](#)); en los cuales si se utiliza el riego con aguas residuales o de mala calidad aumenta los problemas de salinidad, en consecuencia este tipo de estudio es relevante, debido a que se requiere entender los mecanismos que originan la salinización (sodicidad); así como, las repercusiones en la vegetación, fertilidad del suelo y las actividades socioeconómicas.

Por lo que la problemática de salinidad de suelos es un fenómeno creciente que no ha sido atendido aún en este municipio de Tierra Nueva.

1. 4 Hipótesis

Los minerales de las rocas volcánicas son alterados de manera natural para la formación de suelos que, al interaccionar con el agua, incorporan iones que generan problema de salinidad en suelo y agua. Este proceso puede ser acelerado por la actividad antropogénica cuando hay una aguda actividad

agrícola y un uso inadecuado del recurso, incrementando el problema de salinidad del suelo y agua, con afectación en la vegetación.

1. 5 Planteamiento del problema

El problema principal en el área de estudio es la salinidad de suelos como un fenómeno creciente, observable en la coloración del suelo con manchas u horizontes blanquecinos en algunos puntos determinados en el área de estudio, donde este tipo de estudio toma importancia, dado que es necesario comprender los procesos que conducen a la salinización, y sus impactos en el vigor de la vegetación nativa, la fertilidad del suelo y la producción agrícola. En este sentido, la presente investigación puede aportar respuestas y posibles soluciones a esta problemática ¿Cuál es el origen de la salinidad? ¿Cuáles son sus afectaciones al ecosistema? Con diferentes métodos o técnicas multidisciplinarias nos permiten integrar los diferentes procesos ambientales que dan origen y desarrollo de este fenómeno.

A nivel mundial el factor agua es un tema de necesidad y problemática para poder satisfacer las necesidades humanas o de cualquier ser vivo, pero en las últimas décadas con escasez, contaminación natural (interacción agua-roca) y antropogénica (agricultura, drenaje, etc.), sobreexplotación del agua y ecosistema, son elementos de importancia que tienen una afectación directa o indirecta en conjunto con la salinización y pérdida de suelo.

Capítulo II

2. 1 Área de estudio

El Municipio de Tierra Nueva (Fig. 2.1), San Luis Potosí se localiza al Sur del Estado de San Luis Potosí entre las coordenadas geográficas 21° 40' de Latitud Norte, y 100° 35' de Longitud Oeste; ([Datum WGS84, 1996](#)), y cuenta con 138 localidades a una altura promedio de 1,780 metros sobre el nivel del mar.

Delimitada al Norte, Oriente y Poniente con el Municipio de Santa María del Río, y al Sur colinda con el municipio de San Luis de la Paz, Guanajuato en estas colindancias se presenta la parte topográfica de mayor aporte de escurrimientos a la localidad.

2. 2. Vías de Acceso

Partiendo de la ciudad de San Luis Potosí, a través de la carretera Federal No. 57 que comunica con la ciudad de Querétaro realizando un recorrido de 63 km hasta la cabecera municipal de Tierra Nueva (Fig. 2.1), hasta el kilómetro 51 se encuentra la desviación del entronque y de ahí a 13 km se encuentra la cabecera municipal de Tierra Nueva contando con pavimentación en sus calles principales, las rancherías solo cuentan con poco tramo pavimentado a lo que algunos puntos de acceso son terracería.

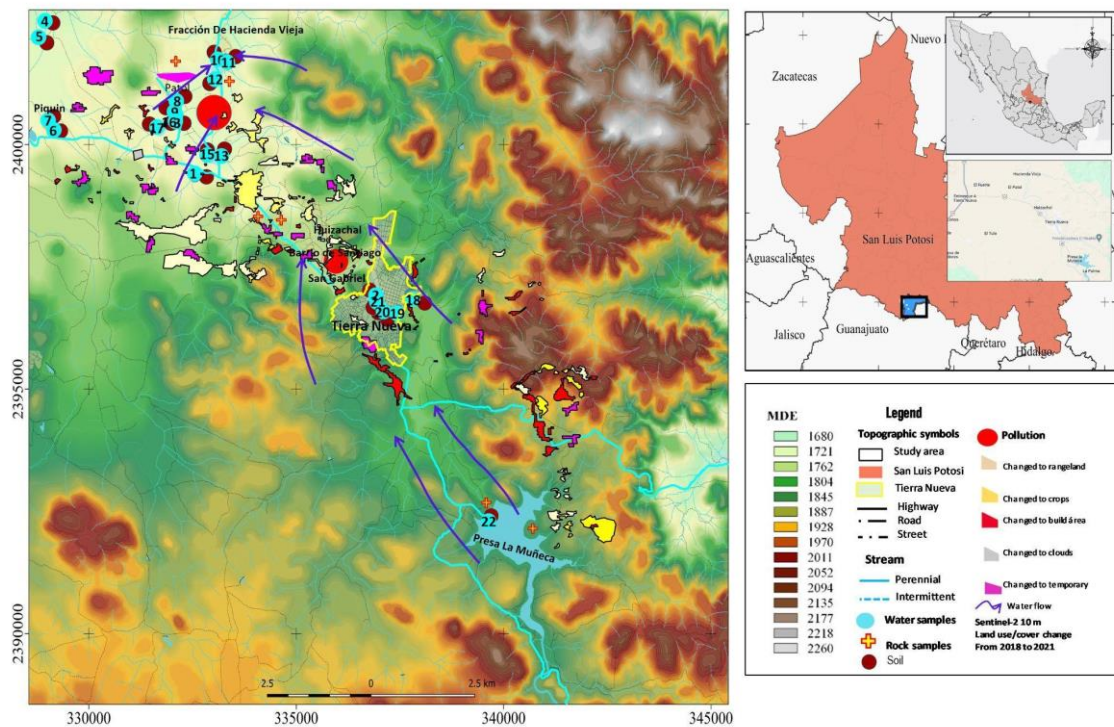


Figura 2.1. Tierra Nueva, S.L.P. zona de estudio, recorrido en la toma de muestras de agua, de mano en rocas ígneas, rango de temperaturas, isotópicas y vegetación.

2. 3. Fisiografía

Labarthe-Hernández *et al.*, 1982; mencionan que el Campo Volcánico de San Luis Potosí (CVSLP), geológicamente desarrollado en la porción centro-sur del estado. Labarthe-Hernández *et al.*, 1982 describen como un paquete de unidades volcánicas (está dividido en seis complejos: Ahualulco, Pinos, Villa Hidalgo, La Repartición, Sierra San Miguelito y Santa María), en consecuencia, el paquete de rocas a estudiar es **Santa María**, pero localización puntual El Municipio de **Tierra Nueva** tuvo una formación desde el Eoceno al Cuaternario.

Así mismo el inicio del vulcanismo del CVSLP es desde el Eoceno medio con la emisión de derrames de lava andesítica sobre sedimentos lacustres del Paleoceno tardío al Eoceno temprano-medio ([Labarthe-Hernández et al., 1982](#)), menciona que posteriormente en el Oligoceno se deposita un paquete de lavas piroclastos de composición intermedia a riolítica, el mayor volumen de depósito de rocas volcánicas félsicas entre los 32 y 26 Ma, en los 22 y 20 Ma el vulcanismo fue restringido describe ([Labarthe-Hernández et al., 1982](#)), con carácter bimodal siendo basaltos y riolitas casi contemporáneas, finalizando en etapas intermitentes de lavas basálticas del Plio-Cuaternario. A partir del Oligoceno en los diferentes complejos volcánicos de domos exógenos y depósitos piroclásticos de composiciones que van desde dacita y andesita rica en potasio hasta riolita, o derrames de lava andesítica a basáltica por diferentes patrones tectónicos de fallas o fisuras del Paleoceno ([Tristán-González et al., 2008](#)). Complejo Volcánico Santa María (CVSM) localizado al occidente del Campo Volcánico del Río Santa María ([Labarthe-Hernández et al., 1984](#); [Tristán-González, 1987](#); [Aguillón-Robles et al., 2004](#)).

2. 4 Geomorfología

La geológica del Folleto Técnico No 109 Tierra Nueva F14-C25, escala 1: 50,000, [Tristán-González, \(1987\)](#), alude uno de los eventos principales estructurales, que es representada por el emplazamiento del intrusivo Palo Verde de composición riolítica hace énfasis en fallas normales con orientación predominante 290° - 300°, sobresaliendo la gran falla del Río Santa María, estructuras que tienen una continuidad a la zona de estudio de interés en este caso anteriormente mencionado, concordado con lo que menciona la carta F 14-C 25 se tiene rocas

contemporáneas en edad, rocas volcánicas (ígneas, riolitas y dacitas), desde sus límites con San Antonio de Los Martínez, La Joyita, colindantes con Guanajuato, El Paso del Balcón, Camarón, Divisadero límites con el Municipio de Santa María y Río Verde, La Querencia, Hacienda Vieja límites con San María del Río solamente, establecidos en una franja de rocas ígneas.

El vulcanismo del Oligoceno temprano toma un papel importante ya que es atribuido a eventos ocurridos cuando la placa norteamericana colisionó con la dorsal del Pacífico, subducción, deformación y magmatismo continental, origen geológico la zona de interés del presente trabajo.

En Tierra Nueva, el relieve es variante entre 1,6000 a 2, 600 m.s.n.m., su orografía se compone de sierras, lomas y mesetas, su depresión más baja se localiza en porción central del drenaje principal del Río Santa María con dirección NW-SE; teniendo una topografía abrupta ejemplo: El Divisadero, El Picacho, Tuna Mansa, El Temeroso y la Mesa de Sal si puedes principalmente siendo las de mayor importancia con respecto a elevaciones permitiendo el escurrimiento natural del agua, por consiguiente alimenta a la Presa La Muñeca La geología y litología de la región en la Figura 2.2, está compuesta principalmente por: rocas ígneas riolíticas.

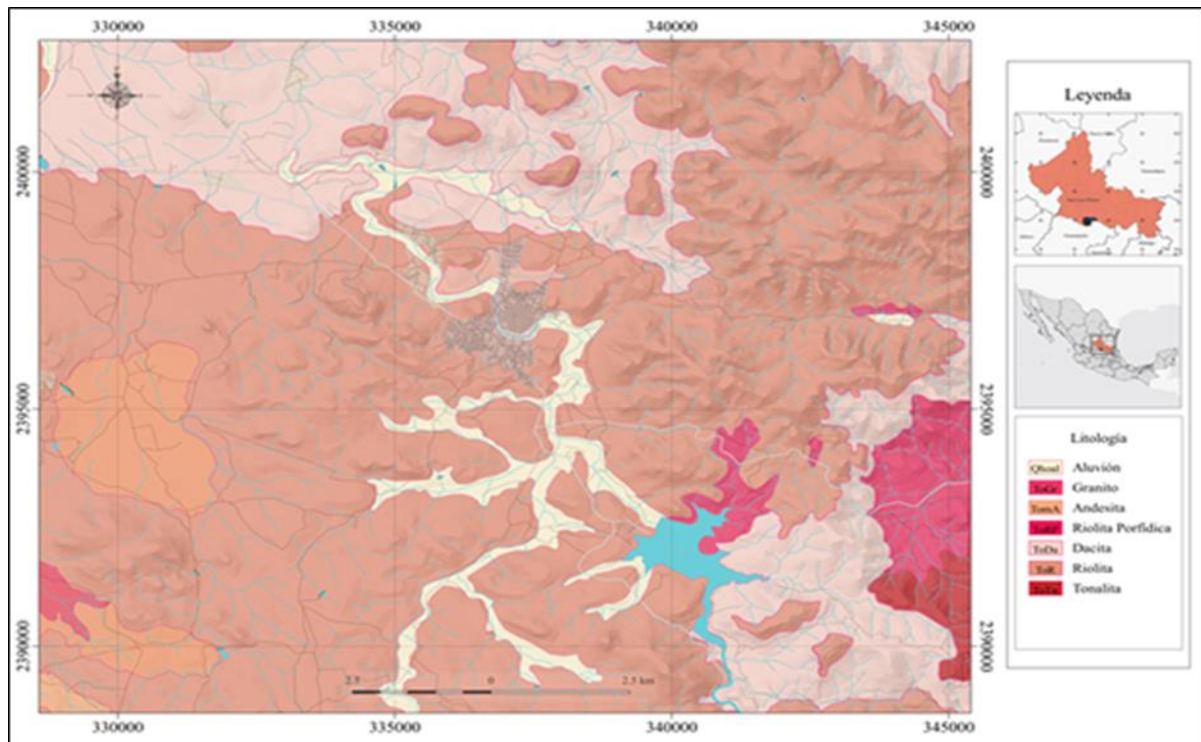


Figura 2.2. Geología del acuífero de Tierra Nueva, S.L.P.

2. 5. Clima

El clima seco templado con lluvias en verano es el predominante en la mayor parte del territorio municipal se presenta hacia el centro; al noroeste prevalece el semiseco semiárido; al noreste una porción de clima seco semiárido (Fig. 2.1). Su temperatura media anual es de 19°C con registros máximos de 44°C y una mínima de -8°C donde la temporada cálida comprende de marzo a octubre con periodos fríos de noviembre a febrero; así mismo la precipitación anual promedio es de 363 mm, con una evaporación potencial de 1755 mm.

2. 6. Edafología

Edafológicamente los tipos de suelos (Fig. 2.3) con respecto al análisis de suelos por medio del mapeo y constatado en toma de muestras siendo variables por el origen de roca ígnea, en menor porcentaje se tiene Fluvisol siendo de mayor porcentaje el Litosol estos con respecto al Valle de la zona de estudio sin embargo se cuenta con suelos Xerófilo, Regosol y Luvisol respectivamente concordante con al clima presente de semidesértico y aunado a la geología del lugar de rocas ígneas principalmente rolitas y rolitas porfídicas presentando un alto intemperismo observado in situ.

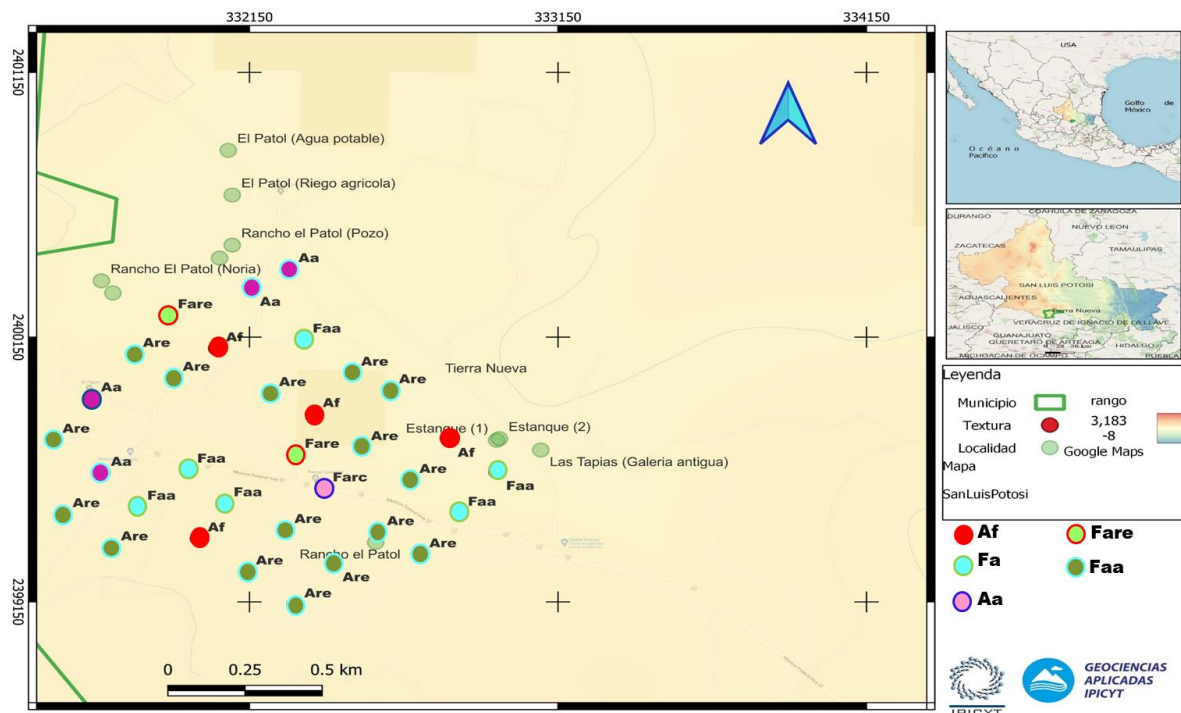


Figura 2.3. Clasificación de tipos de suelo con respecto a muestras de campo en el Municipio de Tierra Nueva, S.L.P.

2. 7. Hidrografía

Según el Diario Oficial de la Federación (DOF) las aguas superficiales del Estado de San Luis Potosí se componen por dos regiones principales hidrológicas siendo estas las siguientes: El Salado con el 56.5% RH37 “EL Salado” y RH26 “Pánuco” con el 43.4% y se anexa el resto 0.1% le pertenece a la región hidrológica RH12” Lerma-Santiago”, en la zona de estudio el municipio de Tierra Nueva se tienen climas secos templados esto debido a la altitud y latitud.

Así mismo Tierra Nueva se encuentra localizada en la Región Hidrológica número RH26 Pánuco ubicada en el Estado de San Luis Potosí dentro de este los ríos que lo comprenden son: Verde, Tampaón, Frío o Gallinas, Valles, Moctezuma-Pánuco y Santa María, este último es parte del estudio del presente trabajo que se enfoca el posterior análisis; partiendo de la Presa La Muñeca una de las presas existentes en el estado que se suma a la Región Hidrológica a la zona de estudio donde su uso predominantemente es agrícola por consiguiente los pozos y norias (Fig. 2.4) localizados en el área de estudio se encuentran sobre el cauce del Rio Jofre donde el acuífero se encuentra en el material que rellena el valle; presentando en el resto de la zona una mala conductividad hidráulica.

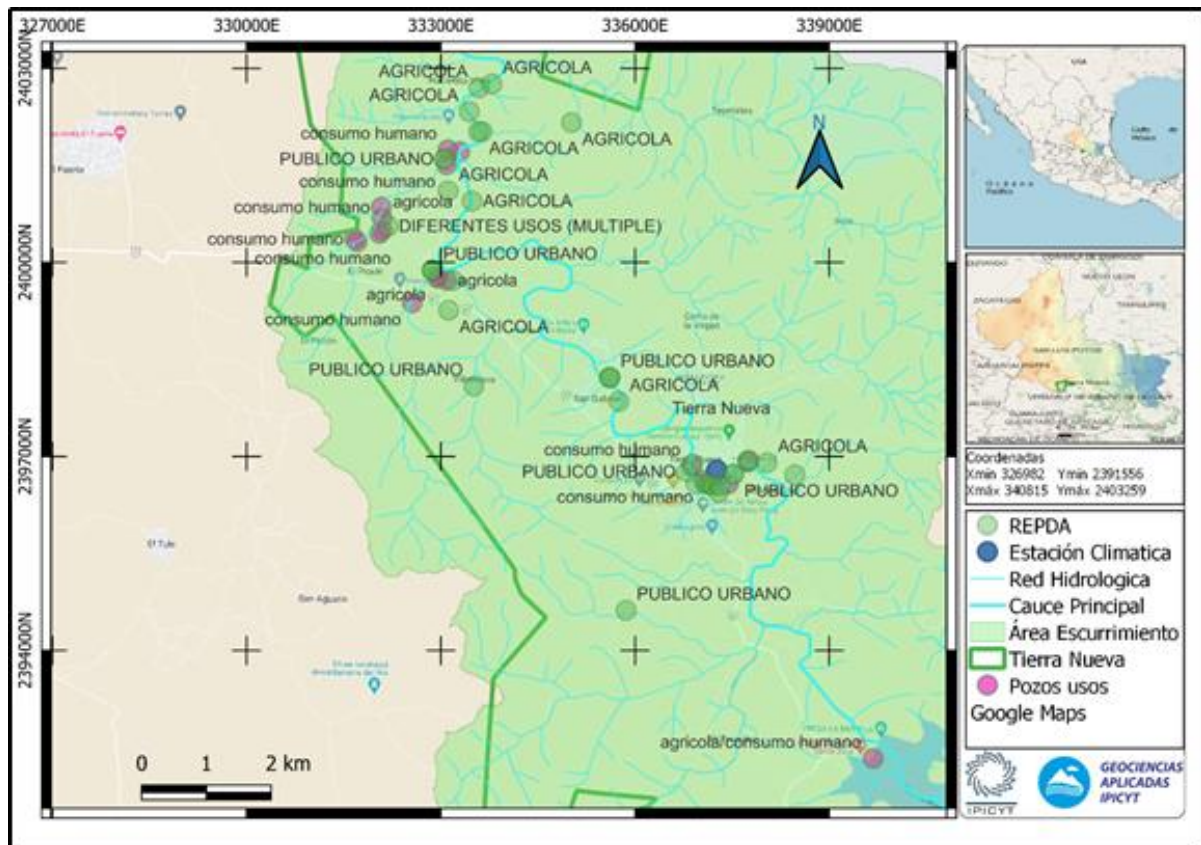


Figura 2.4. Cauce principal del municipio de Tierra Nueva y toma de muestras de agua pozos, norias.

2. 8. Uso de suelo

En datos generales en México, el uso de del agua según (CONAGUA, 2013), ocupa un 75.7% el resto se divide entre abasto público, actividad industrial y termoeléctrica con referencia a San Luis Potosí, ocupa un alto porcentaje también con un 63.9% (CONAGUA, 2013) pero particularmente de manera económica rentable su uso es la agricultura, ya que este forraje se produce en gran parte del país como: Chihuahua, Coahuila, Sonora, Durango, Zacatecas, Jalisco, Guanajuato, Aguascalientes y San Luis Potosí.

2.9 Vegetación:

En Tierra Nueva, San Luis Potosí, la vegetación predominante es de tipo matorral, incluyendo matorral espinoso y matorral desértico. También se encuentran nopaleras, izotal, cardonal y pastizales, así como maguey y otras especies en suelos rocosos y arenosos.

El matorral:

Matorral desértico micrófilo: Arbustos con hojas pequeñas, un estrato subarbuscivo espinoso y perennifolio ejemplo: *Larrea tridentata* y *Flourensia cernua* (Rzedowski, 2006). *L. tridentata* (La Gobernadora).

Matorral desértico rosetófilo: Especies como agave lechuguilla y yuca carnerosana. (Rzedowski, J., 2006).

Matorral espinoso: Dominante en zonas áridas con vegetación principalmente dominante como: *Prosopis spp.* (Mezquite), *Mimosa spp.* (Uña de gato), *Acacia amentacea*, *Acacia vernicosa* (Chaparro prieto). (Rzedowski, J., 2006).

Matorral crassicaule: Tipo vegetativo dominado en forma fisonómica por cactáceas grandes con tallos aplanados o cilíndricos, nopaleras y cardonales.

Pastizal inducido: existen elementos de disturbio que alteran o modifican la estructura secundaria herbácea, arbustiva, arbórea ejemplo: Incendios, huracanes, erupciones, heladas, nevadas, sequías, inundaciones, deslaves, plagas, variaciones climáticas. (Hernández X., E. 1964)

Bosque de pino - encino: debido a la gran diversidad de ambientes en que puede presentarse este tipo de bosques, las asociaciones pueden ser muy variables ejemplo: (*Juniperus* y *Quercus spp.*), *Baccharis* (chamizo), *Vaccinium* (chaparrera), álamos (*Populus*), madroños (*Arbutus*). ([Lifeder, 2023](#)).

El Mezquite y el Huizache son árboles típicos de las regiones cálidas y semidesérticas en México. Ambos forman parte de la familia de las leguminosas, lo que les ayuda a fijar nitrógeno en la tierra, haciendo que esta sea más fértil.

El mezquite (*Prosopis spp*) es un tipo de árbol que proviene de México. Se desarrolla en áreas semidesérticas donde hay escasas lluvias. Este árbol es muy resistente a la falta de agua. Puede alcanzar hasta 9 metros de altura, su madera es dura y tiene ramas con espinas. Las hojas del mezquite son estrechas y bipinnadas, y pueden llegar a medir hasta 7.5 cm. Las vainas eran una parte importante de la dieta en varios estados del país. Además, algunos mamíferos pequeños y ciervos también se alimentan de ellas. Las semillas, al igual que muchas otras legumbres, son ricas en proteínas y carbohidratos ([Ruiz-Nieto et al 2020](#); [Aguirre-Loredo 2025](#)).

El Huizache (*Vachellia farnesiana*) es un árbol que crece rápidamente y se desarrolla bien en áreas secas, siendo capaz de resistir sequías. Su nombre proviene del idioma náhuatl y se traduce como "Huele a Miel", debido al dulce aroma que emiten sus flores. Puede llegar a medir hasta 12 metros de altura y se halla en diferentes tipos de terreno, siempre que tengan un buen drenaje.

Su tronco es corto y tiene muchas ramas, lo que le da una forma que recuerda a

un paraguas. Las ramas están llenas de espinas y sus hojas son compuestas, con pequeñas hojitas secundarias. Las flores son de un amarillo brillante, tienen un aroma agradable y llaman mucho la atención. Al igual que el mezquite, el huizache genera vainas planas donde se encuentran sus semillas.

Capítulo III

3.0 Marco teórico

3. 1.0 Percepción Remota.

Bases teóricas de la percepción remota, permitiendo un análisis espectral de antelación sin invasión, rápido, gratuito, permitiendo conocimiento aparente de la zona de estudio desde el punto de vegetación, suelo, morfología, salinidad e hídrico.

La teledetección implica la adquisición de información sobre un objeto o fenómeno sin contacto físico, generalmente mediante la detección y medición de la radiación electromagnética reflejada o emitida por el objeto ([Misra, A.A. 2022](#); [Fiete, R.D. \(2015\)](#)).

La teledetección se basa en los principios de la radiación electromagnética, lo que incluye la comprensión de las propiedades de las ondas electromagnéticas y sus interacciones con la materia ([Elachi, C., van Zyl, J. 2006](#); [Ajmi, D., 2009](#)).

Se utilizan diferentes partes del espectro electromagnético (por ejemplo, visible, infrarrojo, microondas) para diversas aplicaciones de teledetección, cada una de las cuales proporciona información única sobre la superficie y la atmósfera de la Tierra. ([Elachi, C., van Zyl, J. 2006](#); [Matthaeis, P. 2021](#); [Tiwari, S, et al., 2023](#)).

La interacción de la radiación electromagnética con la superficie terrestre y la atmósfera es crucial para interpretar los datos de teledetección. Esto incluye

comprender cómo los diferentes materiales absorben, reflejan y emiten radiación. (Ajmi, D., (2009; Varotsos, C.A. 2021; Borg, E. *et al.*, 2022).

3.1.1 Tipos de sensores:

Varios sensores están diseñados para detectar longitudes de onda específicas de radiación, lo que permite la recopilación de datos en diferentes bandas espectrales (Ajmi, D., 2009; Borg, E. *et al.*, 2022).

Los datos de teledetección se recopilan utilizando plataformas como satélites, aeronaves y drones, que llevan sensores para capturar imágenes y otros datos. (SGEM, 2020; Schowengerdt, R.A. 2006; Laffly, D. 2020).

3.1.2 Procesamiento de imágenes:

Se utilizan técnicas como la mejora de imágenes, la clasificación y la fusión de datos para procesar y analizar datos de teledetección, lo que permite la extracción de información significativa (Ajmi, D., 2009; Tiwari, S. *et al.*, 2023; Schowengerdt, R.A. 2006).

3.1.3 Aplicaciones:

3. 1.3.1 Monitoreo ambiental:

La teledetección se utiliza ampliamente para monitorear los cambios ambientales, incluida la salud de la vegetación, el contenido de agua y la contaminación. (Tiwari, S, *et al.*, 2023; Chuan, L. *et al.*, 2013).

3. 2.0 Petrografía:

Es una rama de la geología, se centra en el estudio de las rocas, incluyendo su presencia, composición, textura, estructura, origen y evolución.

Comprender la coexistencia y los patrones espaciotemporales de los minerales en las rocas es fundamental. Esto implica el estudio de sistemas simplificados para representar las complejidades naturales y el uso del análisis de redes para visualizar patrones de mayor dimensión ([Morrison, S.M. et al., 2017](#))

3.2.1 Petrología experimental:

Este campo simula condiciones de alta presión y temperatura para estudiar el comportamiento fisicoquímico de minerales y rocas, proporcionando información sobre los procesos internos de la Tierra y la génesis de minerales y rocas. ([Ni, H. et al., 2022](#))

3.2.2 Geoquímica:

Un aspecto crítico que recorre la historia de la investigación petrológica, ayudando en la cuantificación y comprensión de los procesos de formación de rocas ([Chen, X. et al., 2023](#); [Jia, J.-W. et al., 2023](#)).

3. 2.3 Petrología estructural

Petro Fabric Análisis:

Implica reconocer y describir las propiedades geométricas de las fábricas de roca.

Petro Tectónica:

Establecer relaciones entre las propiedades geométricas y los movimientos o tensiones implicados en la generación de tejidos, e inferir fuerzas o tensiones causales ([Tex, E.D. 2024](#))

Petrología metamórfica. Transformaciones minerales:

El estudio de las transformaciones minerales en rocas, incluyendo la cinética del metamorfismo y el concepto de facies metamórfica, que describen la diversidad de conjuntos minerales en diferentes condiciones ([Reverdatto, V.V. et al., 2019](#); [Zou, Y. et al., 2022](#)).

Procesos de difusión:

La difusión intracristalina es crucial para comprender los procesos metamórficos, ya que afecta la zonificación del crecimiento mineral y brinda información sobre las tasas y duraciones de estos procesos ([Niu, Y. 2021](#)).

3.2.3 petrología Ígnea

Generación y evolución del magma:

Estudio de las relaciones de fases, la química mineral y las características de los oligoelementos para comprender los procesos de generación y evolución del magma. Esto incluye el papel de la fusión del manto y la influencia del espesor de la litosfera en la composición del basalto ([Ray, J., Sen, G., Ghosh, B. 2011](#); [Massuyeau, M. et al., 2021](#); [Boggs, S. 2009](#)).

3. 2. 4 petrología sedimentaria

Clasificación y nomenclatura:

Descripción y clasificación sistemática de rocas según su mineralogía, química, texturas y estructuras sedimentarias. Esto facilita la comprensión del origen deposicional y los procesos diagenéticos ([Steel, R.J., Milliken, K.L. \(2013\)](#)).

Sucesión de fases: El concepto de sucesión de fases para entornos deposicionales, impulsado por estudios sistemáticos de entornos modernos y datos sísmicos ([Brady, J.B. 2009](#)).

3.2.5 Enfoques interdisciplinarios: combinación de métodos experimentales, analíticos y computacionales para abordar cuestiones geológicas complejas. ([Ni, H. et al., 2022](#)).

La petrografía se utilizó para conocer sus componentes minerales y alteraciones no visibles que la sección de láminas delgadas permite describir de manera más precisa.

3.3.0 Difracción de Rayos X (XRD)

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica que analiza la estructura de los minerales y las rocas, basándose en el fenómeno físico de la difracción, que ocurre cuando los rayos X se reflejan en los átomos de un sólido cristalino generando información como su estructura cristalográfica, composición química, tamaño de los cristales, etc. ([Cordero-Borboa, A. E. 2000a](#); [Cordero-Borboa, A. E. 2000b](#)).

Este método se utilizó para corroborar la presencia de determinados minerales vistos en la metodología petrográfica que influyen en el ambiente de estudio.

3. 4.0 química de suelo

Los suelos transportan el agua, siendo el hogar de miles de bacterias presentan muchas interacciones diferentes de rocas o minerales meteorizados, que, con el paso del tiempo, la composición química de los suelos y minerales va cambiando, dejando una huella o evidencia de esa evolución. Por ello la importancia del análisis de química de suelos; son mezclas heterogéneas de aire, agua, sólidos inorgánicos y orgánicos (animales y vegetales), ([Sparks, 2019](#)) generando diferentes escalas de espacio y tiempo.

Anteriormente, la química del suelo se centraba en las reacciones químicas de los suelos que afectan al crecimiento de las plantas y su nutrición, pero con el paso del tiempo y aún más en la actualidad ha aumentado la preocupación por conocer los contaminantes y el impacto generado en la calidad del agua, la salud de las plantas, animales por supuesto en los seres humanos ([Sparks, 2019](#)); el contenido de salinidad que tiene las propiedades químicas del suelo conduce corriente, en este caso la sal ionizada suelta o liberan proporcionalmente una conductividad de electricidad esto debido al contenido de sal, esta carga de iones no permite el desarrollo de plantas o vegetación de manera normal.

3. 4.1 conceptos Fundamentales el análisis químico del suelo permite:

- **Evaluar la fertilidad del suelo:**
Identificar los nutrientes esenciales (nitrógeno, fósforo, potasio, etc.) tal como su disponibilidad para las plantas.

□ **Detectar** **contaminantes:**

Reconocer la presencia de metales pesados, pesticidas u otros contaminantes que puedan afectar la salud del suelo en el medio ambiente.

□ **Entender la dinámica de nutrientes:**

Comprender cómo los nutrientes se adsorben, desorben, se transforman en el suelo, influyendo en su disponibilidad para el crecimiento de las plantas.

□ **Optimizar la agricultura:**

Ayudar a los agricultores a elegir los cultivos adecuados, ajustar el uso de fertilizantes y realizar prácticas de manejo del suelo que promuevan la salud y productividad.

□ **Proteger el medio ambiente:**

Identificar posibles fuentes de contaminación y tomar medidas para prevenir o remediar la degradación del suelo.

□ **Investigar la historia del suelo:**

La química del suelo puede ayudar a comprender la formación y evolución de los suelos, así como la influencia de factores como el clima y la actividad humana [Sparks, D.L. \(2019\); Soil Science Society of America. 2022; Lindbo, D.L., et al., 2012\).](#)

3. 5.0 Hidrogeoquímica:

La hidrogeoquímica es una disciplina que estudia las interacciones químicas entre el agua y los componentes geológicos, así como los procesos que determinan la composición química del agua subterránea y superficial.

El agua natural se encuentra expuesta a una serie de procesos geoquímicos que afectarán su calidad y le proporcionarán una huella química, sus aniones,

caciones y elementos traza que nos facilita categorizarla en familias de agua; además, identificar el tipo de rocas por las que ha fluido y qué tipo de procesos han propiciado su evolución ([Fenzl, 1988](#)).

A continuación, se presentan las bases teóricas fundamentales de esta ciencia:

3. 5.1 Conceptos Fundamentales

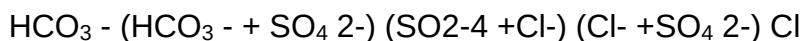
Evolución Hidrogeoquímica:

La composición química del agua cambia a medida que se desplaza a través de diferentes formaciones geológicas. Este proceso está influenciado por factores como la litología, el tiempo de residencia del agua, la velocidad de flujo y las condiciones climáticas.

La evolución del agua subterránea está profundamente influenciada por la geología del lugar, ya que la composición de los minerales en las rocas determinará qué iones se incorporan al agua a lo largo del tiempo. Además de la precipitación y otros factores como la interacción con sedimentos, la actividad biológica y los procesos de disolución también contribuyen a la evolución de la composición química del agua.

La formación del agua subterránea está fuertemente influenciada por procesos como la dilución y la precipitación de minerales (esto conlleva transformaciones de fase de especies disueltas en el agua a especies que se precipitan en los sedimentos). Desde que se infiltra en el subsuelo, el agua ha experimentado una evolución química, la cual es detallada por [Chevoratev en 1995](#), quien recopiló los estudios químicos de más de 200.000 estudios. 9,719 muestras de agua

subterránea y 3,364 núcleos en diversas regiones del mundo descubriendo que el desarrollo del agua comienza como se muestra a continuación:



La composición química del agua subterránea durante su trayecto e interacción con el medio geológico. Al incrementar la cantidad de sólidos totales disueltos en la dirección del flujo del agua subterránea, también se incrementa la fase aniónica, transformándose de un agua bicarbonatada a una sulfatada y finalmente a un agua clorurada. Al infiltrarse a mayor profundidad se produce una reducción en el oxígeno disuelto y el CO_2 , ocurre una alteración en el potencial de reducción de óxido, que disminuye, los pH que en un inicio son un tanto ácidos en el agua de lluvia, al infiltrarse e interactuar con el suelo y la roca aumenta este valor de pH a valores de 7 a 8.5 (básicos). En áreas de recarga, los procesos de disolución son habituales, mientras que, en áreas de descarga, se presentan procesos de precipitación de minerales. (Según Chevotarev; Mifflin; Tóth 1999).

Interacción Agua-Roca:

La hidrogeoquímica se centra en las reacciones químicas entre el agua y los minerales presentes en las rocas. Estas interacciones incluyen procesos de disolución, precipitación, intercambio iónico y adsorción.

Uno de los procesos que explica la disolución de material rocoso es por medio de reacciones ácido base en la cual existen teorías para la interpretación de dicho proceso las principales son: Teoría de Arrhenius, Teoría de Brosted-Lowry y la teoría de Lewis que no se contrapone a las anteriores, sino que suma que

existen sustancias que no contienen hidrógeno y al desasociarse presentan características de los ácidos.

En la primera teoría se describe como un ácido es una sustancia que cuando se disuelve en agua libera iones hidrógeno, H^+ y una base es una sustancia que, al disolverse en agua, libera iones hidroxilo, OH^- .

El ácido y las bases se definen normalmente en términos de transferencia de protones (el brosted-Lowry). Un ácido es una sustancia (molécula o ion) que puede transferir un protón, H^+ , a otra sustancia. Una base es una sustancia que puede aceptar un protón.

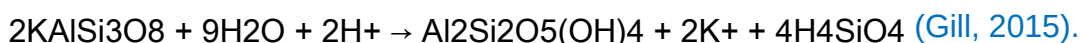
Estas reacciones modifican el pH del agua, produciendo reacciones con los elementos que encuentre en su trayectoria. Tal es el caso de los silicatos y carbonatos que, al modificar su pH, propicia la disolución de minerales que contienen estos iones.

Sin embargo, se tienen presente dos tipos más de interacción la Disolución y Solubilidad de la sílice ya que la sílice es el silicato dentro de la composición química más sencilla y el mineral más común en la gama de las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias y se expresa: $SiO_2 + 2H_2O \rightarrow H_4SiO_4$.

La otra es la Disolución incongruente produciendo una o más fases sólidas secundarias y especies disueltas o acuosas naturales (roca ígnea compuesta de plagioclasas, feldespatos potásicos y cuarzo) presentando la meteorización. Así la disolución incongruente de feldespato (anortita, albita o microclina) produce un mineral hidratado de las arcillas liberando cationes de (Ca^{2+} , Na^+ , K^+) y iones

de bicarbonatos este proceso lleva a la Hidrólisis donde estos donde los cationes de la estructura del feldespato se reemplazan hidrógeno.

Ejemplo disolución incongruente del feldespato potásico:



Proceso Redox:

Óxido reducción lo podemos definir como la transferencia de electrones entre las sustancias que participan, se las conoce como reacciones de óxido-reducción. En este equilibrio la ecuación se compone por una agente oxidante la cual será la especie capaz de oxidar a otra, por lo tanto, puede adquirir los electrones, el agente reductor será aquella capaz de reducir a otra, esto es puede ceder los electrones que requiere esta otra especie química, por lo tanto, reduce oxidándose. Al tratarse de un equilibrio los procesos siempre se tendrá un par oxidante y otro reductor.

Una vez que el agua alcanza la superficie freática más próxima y hasta que sale en exterior un río, manantial, etc., pueden transcurrir entre días hasta miles de años, y el recorrido puede ser muy corto o de varios kilómetros. De este recorrido y su material geológico, así como del tiempo de exposición, dependerá la química del agua subterránea, lo cual podremos clasificarla como fases hidrogeoquímicas, que, con ayuda de gráficos hidro -geoquímicos, es posible identificar dichos procesos.

Hidrólisis:

[Bowen \(1928\)](#), que observó los minerales cristalizan durante el enfriamiento del magma de acuerdo con dos grandes rutas, la primera se denominada rama discontinua de los minerales ferromagnesianos, y la segunda continua de plagioclasas, que convergen en un tronco común, que corresponde a la cristalización de feldespato potásico y finalmente cuarzo, que son los últimos en cristalizar.

Una vez que las rocas quedan expuestas a la intemperie, ésta puede ser afectada por la presencia de agua, la temperatura y la actividad de los organismos [Hasenmueller et al. 2017](#). Además, debido que los minerales que forman las rocas se formaron a altas condiciones de presión y temperatura muy diferentes a las condiciones ambientales, esto favorece a su inestabilidad [Colman Steven, 1981](#).

La estabilidad de los minerales en condiciones ambientales fue establecida por [Goldich \(1938\)](#), el estableció que los minerales que se forman a más altas temperaturas y presiones son menos estables; mientras que, los minerales que se forman a temperaturas y presiones más bajas son más estables; este comportamiento es similar al patrón de la serie de reacciones de [Bowen \(1928\)](#), en donde con los minerales que son los primeros en cristalizar también son los primeros en los que ocurre la meteorización química.

Desde el punto de vista de estabilidad mineral las rocas máficas y ultramáficas con alto contenido de minerales ferromagnesianas y calcio son muy inestables y se alteran más rápido mientras que las rocas félsicas ricas en sílice y minerales

alcalinos tienen mayor dificultad para alterar. Estas condiciones se manifiestan en la formación de suelos, de tal manera que en regiones con rocas máficas e intermedias la presencia de suelo es notable; en tanto que, en regiones en donde prevalece las rocas félsicas el suelo es escaso.

En el proceso de alteración de los minerales, son liberados los iones formadores de rocas, los cuales se incorporarán posteriormente al agua subterránea para dejar su firma hidrogeoquímica.

Intercambio Iónico:

El intercambio iónico es un proceso hidrogeoquímico importante que influye en la composición química del agua subterránea. Este proceso implica el intercambio de iones entre el agua subterránea y los materiales geológicos circundantes, lo que puede alterar significativamente la calidad del agua y su idoneidad para diversos usos.

Este proceso es frecuente en sedimentos geológicos con presencia de arcillas, que poseen partículas de tamaño coloidal con la habilidad de intercambiarse por absorción en su superficie, a causa de la generación de cargas eléctricas que interactúan con el agua. Los lugares cargados, obtienen grupos OH⁻ que se adhieren entre la superficie del mineral y otras capas de cationes y aniones en la región próxima a los grupos OH⁻, generando una carga neta, que puede ser negativa o positiva, en función de las condiciones ácido base presentes en el medio ([Parks, 1976](#); [MORELL, 1997](#)).

La capacidad para intercambiar iones se basa en el tipo de arcillas, y, es más, elevada en tamaños pequeños, debido a una mayor superficie específica, esta

capacidad se basa en la estructura. Por ejemplo, en la Montmorillonita todos los cationes ubicados en la estructura son intercambiables, mientras que, en la Illita, su estructura que forma parte de una red dificulta su intercambio.

Así mismo, el tamaño de radios iónicos trae consigo una disminución gradual de la capacidad de intercambio en las arcillas ([Fenzl, 1988](#); [Morell, 1997](#)).

Procesos de mezcla.

Es la representación de cualquier mezcla dispersiva entre dos o más miembros extremos a lo largo de una línea de flujo o aguas de diferentes zonas hidrogeológicas (acuíferos, acuitardos) o por combinación de cuerpos de agua superficial con diferentes orígenes y calidades (lagos, ríos, océanos) con el agua subterránea. Los miembros extremos aportan diferentes fracciones de su composición a las aguas que se encuentran acotadas entre éstas ([Genereux et al. 1996](#); [Ramos et al. 2004](#)).

3. 6.0 índice de clorofila SPAD y vegetativos.

El índice de clorofila (CI), medido comúnmente a través del medidor SPAD, permite estimar de manera no destructiva el contenido relativo de clorofila en las hojas, pigmento fundamental para la fotosíntesis. Este índice es un indicador clave del vigor y la salud de las plantas, ya que refleja su estado nutricional particularmente en relación con el nitrógeno y permite detectar posibles deficiencias o situaciones de estrés osmótico asociadas a factores ambientales, climáticos, geológicos y antrópicos. Aunado a las características vegetativas fenológicas (como color de la flor, hojas, tallos) y fisiológicas, se fortalece el diagnóstico integral del vigor vegetal.

En resumen, el índice de clorofila es un indicador valioso para la gestión y el estudio de las plantas, que permite tomar decisiones más informadas sobre la salud, el manejo y la optimización de los cultivos.

Capítulo IV

4.0 Metodologías:

La metodología aplicada es: imágenes satelitales, petrográficos, análisis de DRX, química de suelos, hidrogeoquímica, isótopos ambientales del agua, geofísicos, índice de clorofila SPAD.

4. 1 Petrografía

La composición mineralógica se determinó mediante petrografía con la técnica de sección delgada ([Carpenter, 1856](#)) con la finalidad de un análisis final de observación con un microscopio petrográfico Nikon Eclipse LV100 POL (luz natural/luz polarizada). Examinando por conteo de puntos (100), determinando la presencia de componentes principales.

En total fueron cinco muestras de mano (Tabla 2) roca fresca y alterada de: dos de riolita en presa La Muñeca, dos de dacita Villanueva y dos de riodacita Hacienda Vieja con un total de seis láminas delgadas.

Las muestras fueron tomadas lo más cercanas al flujo de agua de los lugares anteriormente mencionados con la finalidad de observar si se tiene una relación directa del ambiente geológico con los demás factores ambientales, aunado a ello donde se observan los afloramientos de cambio de roca; se procedió a sacar la muestra de mayor tamaño posible calculando obtener al menos una lámina delgada y se resguarda material para posterior análisis de DRX que se describe en otro apartado.

Una vez tomada la muestra en campo se coloca en una bolsa plástica resistente debidamente etiquetada con nombre de la roca, coordenadas, color y demás elementos observables a simple vista estos datos en libreta o cuaderno de campo.

Cuando se llega a laboratorio Petrográfico en este caso de la UASLP del Instituto de Geología, primero se procede a fraccionar las rocas con una cortadora de disco de diamante facilitada por el laboratorio de “Fluidos y texturas Volcánicas” en forma de pequeño rectángulo de aproximadamente 3 x 2 cm de cada roca.

Una vez obtenidas las fracciones de las muestras, se pulieron con diferentes abrasivos sobre un vidrio de 35 x 25 cm y un grosor de 5 mm, el tamaño de grano del abrasivo aplicado en cada etapa depende de la corrección e imperfecciones de la superficie que va de 220, desbaste fino 400, 600, 800 y 1500 para acabado final de la muestra obteniendo un lustre semejante al de espejo.

Posterior al pulido de las muestras se sigue con el pegado (resina epoxy o bálsamo de Canadá junto con el catalizador se calientan para poder ser manipulados) de la roca al portaobjetos de vidrio limpio en una plancheta eléctrica, se eliminan burbujas de aire frotando el portaobjetos sobre la muestra hasta eliminar el total o mayor parte de burbujas, se deja enfriar por un periodo de 24 a 48 horas a temperatura ambiente asegurando esté totalmente seco, se deja un testigo de la muestra por si es necesario corroborar la información, una vez pegada la roca al portaobjetos de manera uniforme se corta el sobrante con una cortadora de disco de diamante, con la devastadora se procede a reducir el grosor, nuevamente se pule de manera artesanal con abrasivo de diferentes espesores mencionados anteriormente, desbaste, hasta obtener el grosor

adecuado evitando eliminar por completo la muestra se va observando al microscopio, la muestra está terminada cuando los colores de interferencia ya no son anómalos y se observan las características de cada mineral.

Elaboradas las láminas delgadas se procede a describirlas en el laboratorio de microscopía del Instituto de Geología de la UASLP, utilizando el microscopio petrográfico con un espesor de 0.5 mm o 25-30 μm donde los colores de interferencia del mineral desaparecen, para ser observada al microscopio anteriormente mencionado que se encuentra en el Instituto de Geología de la UASLP.

4. 2 Difracción de Rayos X (XRD)

Martlab Rigaku Smartlab Rigaku (tubo de rayos X Cu Ka; 40 kV 44 mA) fue utilizado para cuantificar el porcentaje de abundancia de feldespatos, plagioclasa y cuarzo en el análisis de difractogramas en 6 muestras de roca 3 frescas y 3 alteradas. Los procedimientos analíticos, la exactitud y la precisión fueron dados por [Verma et al., \(2021\)](#).

4.2.1 Análisis de SEM y DRX en el laboratorio de Ipicyt, LINAN.

- a. Las muestras seleccionadas se cortan en pedazos o fragmentos con un tamaño de 4 x 4 x 2 cm aproximadamente para facilitar su tritución.
- b. Una vez teniendo los fragmentos de cada muestra de mano se dejan secar a temperatura ambiente con la finalidad de evitar humedad al momento de ser triturados y se haga una mezcla chiclosa.

- c. El equipo de trituración y tamizado se deben lavar o limpiar con acetona antes de cada muestra evitando contaminación entre ellas.
- d. Después de limpiar el equipo se procede a realizar un cuarteo homogeneizando los fragmentos que se trituraran (es importante usar sordinas, tapabocas, bata de laboratorio, lentes de protección), los fragmentos deben tener un tamaño aproximado a una lenteja para obtener el polvo de muestra.
- e. El polvo que se obtiene de la trituración se pasa por tamices de diferentes tamaños: tamiz de 50 mallas, tamiz de 100 mallas, por último, tamiz de 200 mallas, el resultado del tamizado será el polvo que se analizará.
- f. El polvo recolectado del tamizado se coloca en recipientes de plástico, se etiquetan con la clave la tapa y el frasco con marcador permanente de tal manera están listas las muestras para envío de laboratorio.
- g. Se enviaron analizar en el Laboratorio de LINAN en Ipicyt un total de seis muestras.

Este análisis confirma lo observado en las rocas de mano, en láminas delgadas, pero perfeccionando a detalle los elementos con los que se interactúa de manera directa.

4. 3 Hidrogeoquímica

4.3.1 Muestreo de agua y procesamiento de laboratorio:

El muestreo fisicoquímico de este estudio se realizó en Tierra Nueva, San Luis Potosí, durante 2020-2022 en este periodo se tomaron 22 muestras de la Presa La Muñeca, rio Jofre, pozos, norias, manantiales y estanques del sistema

acuífero para determinar cationes y aniones mayoritarios (Figura 2.2). Las muestras fueron colectadas durante el período de lluvia y estiaje.

Todas las muestras de agua fueron colectadas en botellas de polietileno de alta densidad (HDLP), previamente lavadas y enjuagadas 7 veces con agua desionizada. Las botellas para recolección de muestras de agua para determinación de cationes y elementos traza de 120ml, fueron lavados, con HCl al 10% y enjuagados con agua desionizada. Para cada muestra colectada, se determinó in situ de parámetros fisicoquímicos: potencial de hidrógeno(pH), conductividad eléctrica (CE), temperatura (T°C), potencial redox (ORP), oxígeno disuelto (OD), sólidos totales disueltos (STD) y alcalinidad.

Inmediatamente después de ser colectadas, las muestras para cationes y elementos traza se acidifican con ácido nítrico ultrapuro hasta $\text{pH} < 2$. Todas las muestras se almacenaron a una temperatura menor a 4°C. Los iones mayores y elementos traza se analizaron en el laboratorio del Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México. Las concentraciones de cationes mayores Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} y elementos traza fueron determinados por espectrometría de plasma de acoplamiento inductivo óptico Modelo Termo ICAP 6500 Duo de última generación, utilizando los estándares internacionales SLRS-4 y NIST 1640. Técnicamente, una fuente de plasma de acoplamiento inductivo consiste en una corriente de flujo de gas argón ionizado por aplicación de un campo de radiofrecuencia típicamente oscilante a 27.1 MHz. Este campo está acoplado inductivamente al gas ionizado por una bobina refrigerada con agua que rodea a una lámpara de cuarzo que soporta y confina el plasma. En un

apropiado nebulizador y cámara de pulverización se genera un aerosol de la muestra que se lleva al plasma a través de un tubo inyector colocado dentro de la lámpara. El aerosol de la muestra se inyecta directamente en el plasma de acoplamiento inductivo, que somete a los átomos que lo componen a temperaturas de aproximadamente 6,000 y 8,000 K debido a ello, tiene lugar una disociación de moléculas casi completa, consiguiendo una reducción significativa de interferencia química.

La eficaz excitación proporcionada por el plasma de acoplamiento inductivo da lugar a bajos límites de detección para muchos elementos. Esto unido al extenso recorrido dinámico, permite una determinación multielemental eficaz de metales. La luz emitida por el plasma de acoplamiento inductivo se enfoca sobre la rejilla de entrada de un monocromador o policromador que efectúa la dispersión. Se utiliza una rejilla de salida alineada con precisión para aislar una parte del espectro de emisión, para medida de la intensidad empleando un tubo fotomultiplicador (Spence and Cassap).

Los aniones mayores (SO_4^{2-} y Cl^-) se analizaron usando un colorímetro Smart 2 Lamotte, este mide de forma fotoeléctrica la cantidad de luz absorbida por una muestra coloreada con respecto a una muestra incolora (blanco).

El Colorímetro SMART 2 pasa uno de cuatro haces de luz coloreados a través de uno de cuatro filtros ópticos transmitiendo sólo un determinado color o banda de longitud de onda al fotodetector donde es medido. La diferencia en la cantidad de luz de color transmitida por una muestra coloreada es una medida de la cantidad de luz absorbida por la muestra. En la mayoría de los ensayos colorimétricos la cantidad de luz absorbida es directamente proporcional a la

concentración del factor de ensayo produciendo color y la distancia de paso a través de la muestra.

La alcalinidad y HCO_3^- se determinaron en el sitio por titulación. El error de equilibrio iónico (electroneutralidad) fue menor a 5% (Tabla x y Figura x).

4. 3.2. Diagramas Hidrogeoquímicos.

Los datos de hidrogeoquímica del agua subterránea fueron usados para identificar procesos de evolución como interacción agua-roca, disolución, precipitación e intercambio iónico que ocurren en el acuífero por medio de gráficos que ayudan a visualizar estos procesos.

El Diagrama de Piper está formado por dos triángulos equiláteros, donde se representa, respectivamente, la composición aniónica y catiónica del agua y un campo central romboidal en el que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes. Es necesario incorporar las concentraciones de los iones expresadas en $\text{meq} \cdot \text{L}^{-1}$ a % y sólo se puede reunir en cada triángulo tres aniones y/o tres cationes. A cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión. Como aniones suelen representarse por $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, SO_4^{2-} , y $\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$ y como cationes: $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} y Mg^{2+} . Se proyectan los puntos de los dos triángulos inferiores al rombo superior y se grafica el punto en la intersección. Este diagrama permite reflejar las variaciones causadas por mezclas de aguas, precipitaciones-disoluciones, procesos de intercambio iónico; en definitiva, permite ilustrar la evolución hidrogeoquímica de las aguas y establecer de forma directa el tipo de agua en relación con las facies hidroquímicas ([Songlin Cheng, 1988](#)).

El Diagrama de Piper se utiliza para identificar las principales fases hidroquímicas de las muestras de agua subterránea localizada en el transecto de la Presa La Muñeca a la comunidad de Hacienda Vieja.

El diagrama de Mifflin ilustra una clasificación de las muestras basada en la creciente concentración de los iones Na^+ , K^+ , Cl^- y SO_4^{2-} a lo largo del flujo. La clasificación muestra puntos regionales, los cuales corresponden a la descarga en un sistema regional, mientras que, los puntos locales e intermedios se caracterizan por el flujo de descarga de un sistema que limita a las cuencas hidrográficas. El diagrama se construye utilizando los iones en miliequivalentes, sumando cationes (Na^{++}K^+) y aniones $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ por separado, y estos datos se grafican sobre la ordenada, los cationes y aniones en la abscisa en escala logarítmica. La gráfica está dividida en tres secciones que representan los distintos flujos local, intermedio y regional ([Mifflin, 1988](#)).

Los diagramas de dispersión son métodos simples de interpretación de datos hidrogeoquímicos los cuales permiten una evaluación preliminar con relación de iones donde se puede establecer balances estequiométricos entre los iones e identificar procesos como el intercambio iónico, dilución y evolución de las aguas subterráneas en el estudio analizado ([Lloyd et al. 1985](#)).

Los isótopos fueron analizados por espectrometría de masa de relación isotópica (IRMS, por sus siglas en inglés). La técnica emplea “trazadores isotópicos”, que son compuestos enriquecidos (o empobrecidos) artificialmente en un isótopo y que se añaden a un sistema con objeto de facilitar su estudio. El hecho de que los comportamientos fisicoquímicos de los isótopos sean casi iguales en esta

escala de trabajo los convierte en trazadores ideales en hidrología para identificar y cuantificar $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, en aguas y especies disueltas. Para este análisis se realizan gráficas de dispersión donde por una convención se sugiere que el deuterio se coloque en la ordenada mientras el ^{18}O en la abscisa, esto permite la mejor visualización de los datos ([Mazor, 1991](#)).

4. 4.0 Química de suelo

El proceso de análisis de química de suelo consistió en la toma de 11 sitios donde las muestras fueron diferentes:

- ✓ 30 cm de profundidad
- ✓ 60 cm de profundidad

Con el mapeo previo figura 3 y tabla 3 - 4 se determinó el punto de toma de muestras siendo las más representativas con la finalidad de contener las propiedades químicas del suelo y cercanas a la corriente o flujo cercano del agua y del perfil determinado dentro de la zona de estudio siendo los pasos siguientes:

- Selección del lugar
- Se toma los datos de X, Y, Z
- Se perfora a 30 cm
- Se toma su pH
- Conductividad Eléctrica
- Se toma PR
- Se agrega un kilo aproximado por bolsa de plástico resistente o de doble dureza esto para evitar la pérdida del contenido y asegurar sus propiedades.
- Se etiqueta con coordenadas de cada muestra, fecha, hora, lugar o nombre del rancho o dueño.
- Se guardan de manera segura evitando algún tipo de contaminación externa.

En laboratorio se deja secar la muestra de manera natural el tiempo necesario ya que algunas de las muestras contienen mayor humedad.

Dentro de la descripción tomada en campo se agregan algunas notas que sean relevantes o breve descripción de las muestras ejemplo: coloración que se presenta en el momento de la toma como blanquecina, rosa, negro etc. Dando idea al horizonte en el que se encuentra la muestra del suelo; una vez secadas las muestras:

- Se cuartea la muestra
- Si es necesario se tritura si hay rocas grandes
- Se pasa al tamizado en este caso utilizando las diferentes medidas ejemplo: 22 mm
- Se selecciona una porción de aproximadamente 100 gramos para análisis el resto se deja como testigo en caso de repetir un análisis
- Se comienza a clasificar en arcilla, limo, grava, etc.

Esto permitirá poder generar una tabla de Excel con los datos pertinentes correlacionables a las demás metodologías utilizadas en el estudio.

Dentro del trabajo metodológico se observa presencia de sal la cual se libera quedando registro en el suelo esta sal, esta carga de iones que no permiten el desarrollo de plantas o vegetación.

La química del suelo sirve para comprender la composición química, las propiedades y las reacciones químicas que ocurren en el suelo por lo que es importante entender cómo los nutrientes están disponibles para las plantas, su desplazamiento, contaminantes, y cómo influye en la salud del ecosistema.

En resumen, la química del suelo es crucial para comprender y gestionar de manera sostenible los recursos suelo, asegurando la producción de alimentos, la protección del medio ambiente y la salud del ecosistema.

4. 5.0 Muestras vegetales

La toma de las muestras consistió en localizar de manera puntual las especies a experimentar de polen, así mismo se esperó el tiempo necesario de florecimiento

en dos tipos de especies nativas de la zona que son el Huizache (*Vachellia farnesiana*) y el Mezquite (*Prosopis spp.*) a partir de un perfil altitudinal.

4.5.1 Técnica Wodehouse (1935) y Erdman (1960).

- a. Primero se espera la etapa de floración vegetal para proceder a recolectar polen.
- b. Se determinó el lugar de donde se partiría tomando muestras representativas cercanas al flujo de agua para que se tuviera contacto lo más directo posible.
- c. Se tomó la muestra del lado más abundante de flores (lo anterior debido a que donde le daba mayor tiempo el sol la floración era abundante) de las especies Mezquite (*Prosopis spp.*) y Huizache (*Vachellia farnesiana*).
- d. Se eligieron las flores de mayor tamaño asegurando una buena cantidad de polen, la cual se cortó con tijeras de podar plantas, evitando el maltrato de estas, se colocan cuantas más flores sean posibles por frasco.
- e. Cada frasco se etiqueta con nombre de la planta, fecha, coordenadas y breve descripción del lugar donde se realizó el corte quedando registrado en el cuaderno de campo para posible confirmación de datos.
- f. Se dejaron secar por varios días cada muestra a temperatura ambiente en una bolsa de papel previamente etiquetado con los datos anteriores para mantener el control.

4.5.2 Procesamiento o tratamiento de las plantas y separación de muestra en laboratorio:

Las muestras serán separadas de tallo, hojas, específicamente se dejan las flores (preferentemente una abundante cantidad).

a) Proceso de deshidratación de las muestras:

1. En una parrilla a baño María se coloca un vaso de precipitado con agua, posteriormente en tubo de ensaye se agregan las flores, con ayuda de un agitador se trituran las flores sutilmente, y se agrega agua a $\frac{3}{4}$ partes del contenido de las flores.
2. El baño María debe estar aproximadamente a 35°C se procede a dejar hervir durante 15 a 20 minutos (en este tiempo se mueven las flores dentro del tubo de ensayo con un agitador).
3. Pasado el tiempo se sacan las muestras, se dejan enfriar.
4. Con ayuda de un tamiz se elimina el resto de las plantas, células restantes esto con ayuda de una piceta con agua destilada.
5. El material se pasa a un tubo de ensaye limpio, se coloca en la centrifuga por 10 minutos, se precipita, se decanta, agregando ácido acético (este proceso de lavado se repite de 2 a 3 veces).

a) Acetólisis

En este proceso con una pipeta se deja caer de manera muy lenta evitando la mezcla se torne de color amarillo o no servirá la mezcla (saca humo, explota y quemaría la materia orgánica).

1. En los tubos de ensayo se coloca el pellet (materia orgánica o pastilla de polen), agregando la mezcla acetolítica agitando o moviendo para una mejor impregnación, se procede a colocar a baño María se dejan por 10 minutos moviendo constantemente.
2. La finalidad es romper la celulosa para obtener el polen generando limpio (se elimina el protoplasma que impide observar claramente el polen al microscopio) (**NOTA:** en el tubo de ensayo solo se coloca acetólisis a 2 partes de la muestra).
3. Pasando los 10 minutos de baño María se detiene la reacción con ácido acético y se meten a la centrífuga (1 200 rpm), se coloca en un vaso de precipitado, se decanta con cuidado para no perder polen (se repite 2 veces).
4. El proceso de lavado se repite de 2 a 3 veces con agua destilada, se agita y se coloca en la centrífuga por 10 minutos.

c) Montaje de láminas:

1. En una plancha previamente caliente se coloca un portaobjetos, se agrega una gota de bálsamo de Canadá o gelatina glicerizada dependiendo de lo que se tenga como pegamento o base de la muestra.
2. Una vez colocado el bálsamo de Canadá se agrega una gota del pellet o residuo después del centrifugado, se esparce con un palillo de dientes evitando queden grumos gruesos,
3. Se coloca el cubreobjetos, se presiona para sacar las burbujas que impiden observar el polen,

4. Se saca la lámina delgada y se deja enfriar mientras se terminan todas las muestras de montar.

5. Finalmente se dejan en secado dentro del horno a 70°C por 3 días.

4.5.3 Proceso final en microscopio Nikon Eclipse LV100 POL:

1. Observación a microscopio

2. Toma de microfotografías.

Esto con la finalidad de análisis y registro morfológico del polen si es perceptible algún cambio al estar en contacto con suelos y agua salinos en un periodo al menos de dos décadas.

4. 6 índice de clorofila SPAD.

El índice de clorofila (CI) en las plantas se tomó de manera muy puntual determinado desde el perfil que va desde la Presa La Muñeca hasta la parte baja del transecto en este caso en la comunidad de Hacienda Vieja, esto permitió registrar datos desde el contacto con agua de reciente infiltración hasta las zonas de contaminación presente una concentración de salinidad o sodicidad.

Criterios considerados para la muestra

a. Ubicación de la planta cercana al flujo de agua

b. Selección de un elemento vegetal de Mezquite y Huizache

c. En el cuaderno de campo se registraron los datos de fecha, hora especie y observaciones.

d. Se toma el dato de la hoja con mayor intensidad de color y de menor tonalidad

e. Total, de muestras 26 (13 de mezquite, 13 de huizache)

Capítulo V

5.0 Resultados y Discusión

Para comprender el origen de la sodicidad en el suelo, el agua y la vegetación del área de estudio, se analizaron diversos componentes naturales, entre ellos la geología, el tipo de suelo y la hidrogeoquímica. Adicionalmente, se identificaron factores antropogénicos, es decir, modificaciones inducidas por actividades humanas que impactan tanto el suelo como el agua en la región.

Para ello, se empleó una metodología que integra múltiples enfoques y técnicas con el propósito de determinar el origen de la salinidad desde diferentes perspectivas multidisciplinarias. Este Modelo Integral sintetiza el trabajo desarrollado en los capítulos previos, consolidando cada contribución para comprender una problemática de carácter natural y antropogénico que afecta diversas escalas a nivel global.

El modelo propuesto se fundamenta en un análisis detallado de los elementos ambientales vinculados al área de estudio. Se caracteriza por ser una herramienta de aplicación sencilla y de baja invasividad, pero con un alto grado de profundidad en el estudio del ambiente rocoso y su transformación en sedimento. Incluye el análisis petrográfico, textural y químico del suelo, así como la interacción directa con el flujo del agua y la evaluación visual de la vegetación (Figura 5.0).

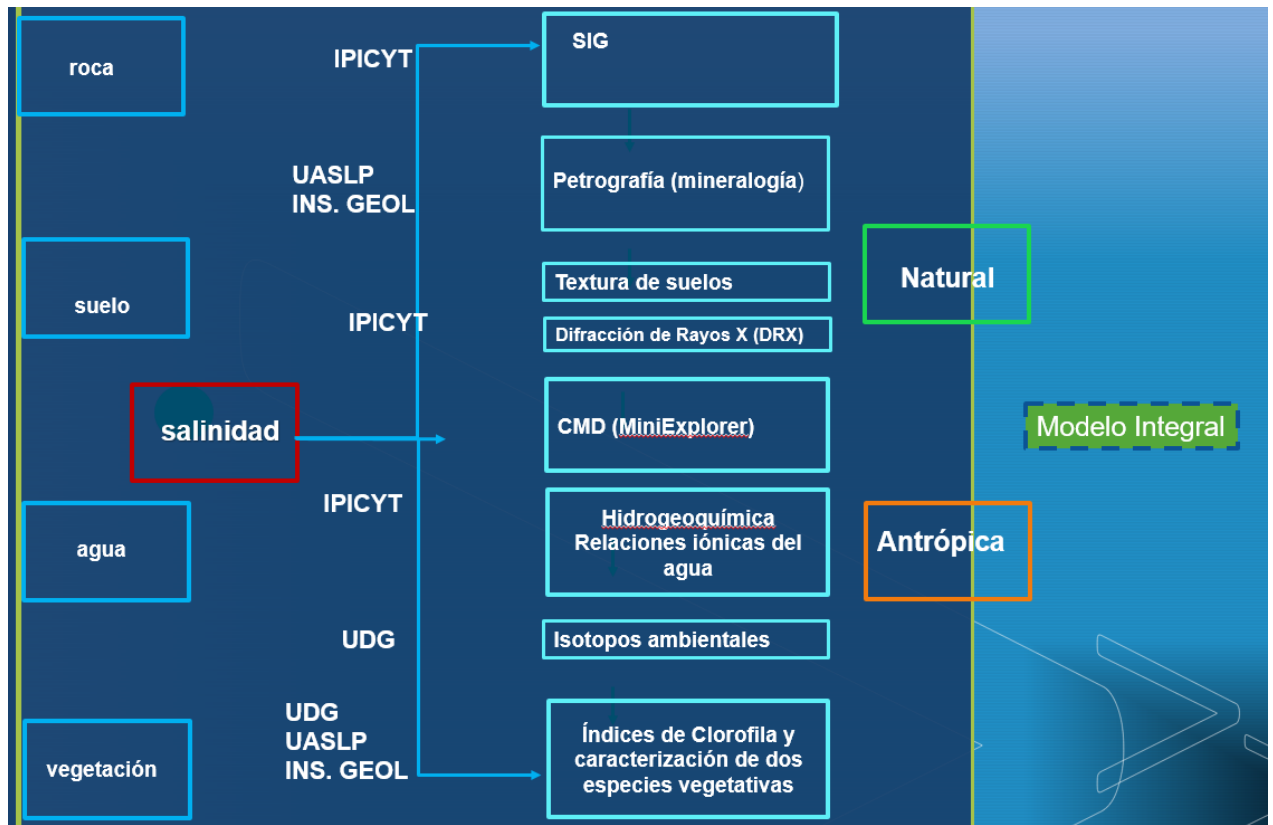


Figura 5.0. Modelo Integral multidisciplinario para análisis y estudio del origen de salinidad en el municipio de Tierra Nueva, S.L.P.

5. 1 Petrografía y alteración mineral (hidrólisis)

El análisis petrográfico de la muestra obtenida en este estudio contiene rocas riolíticas feldespáticas alcalino-dacíticas (Figs. 5.1b, 5.1c, 5.13d y 5.2a, 5.2b, 5.2c). La composición mineralógica de estas rocas volcánicas consiste en fragmentos de matriz vítrea, clastos de feldespatos, plagioclasa, cuarzo y otros minerales como la albita. Uno de los principales elementos es el sodio, que se desagrega en el suelo cuando estos minerales se alteran ([Kaneva, E., Radomskaya, T., Shendrik, R., Chubarov, V., Danilovsky, V., 2021](#)).

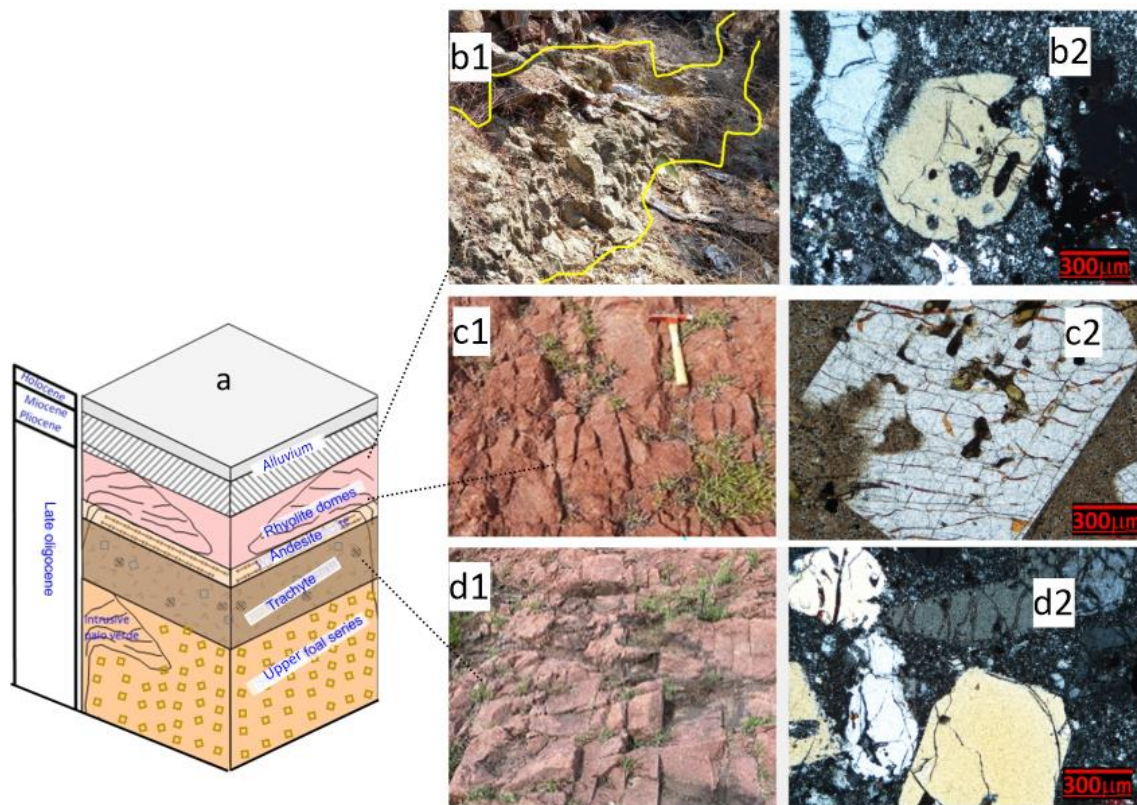


Figura 5.1. a) Columna estratigráfica, b1) afloramiento de riolita porfídica, b2) imagen petrográfica de riolita porfídica, c1) afloramiento de riolita de feldespato alcalino (AF), c2) imagen petrográfica de riolita de feldespato alcalino, d1) rocas dacíticas o riodacitas y d2) imagen petrográfica de rocas dacíticas o riodacitas.

El análisis microscópico muestra una matriz microcristalina con cuarzo y escasa presencia de plagioclasa (Figs. 5.1b2, 5.1c2, 5.1d2). La Figura 5.2b confirma la sodificación y el contenido de esferulitas aisladas, una abundancia de feldespatos en menor medida con feldespatos alcalinos y una textura hipoalítica de la roca, según lo descrito por [MacKenzie \(1982\)](#). En las imágenes petrográficas (Figs. 5.2a, 5.2b, 5.2c), es posible identificar la alteración de los minerales. Por lo tanto, la mayoría de los minerales primarios se alteran a

minerales secundarios (Figs. 5.2a, 5.2b, 5.2c). El cuarzo primario alterado muestra una reacción de borde de minerales máficos, lo que indica un borde de bahía (Figs. 5.2a, 5.2b, 5.2c). Estos minerales de cuarzo probablemente se forman por un reemplazo pseudomórfico hidrotermal de minerales tempranos de cuarzo y calcita [36]. Las figuras 5.2b 5.2c muestran minerales bien definidos rodeados de otros minerales de alteración. Esto puede interpretarse como un grado de meteorización de tipo II, que favorece la incorporación del sodio disponible en el suelo y el agua.

La figura 5.2b muestra un cristal de feldespato rodeado de una matriz arcillosa y se clasifica como un grado de meteorización de tipo III. La figura 5.2c define una plagioclasa con una alteración incipiente rodeada de una matriz arcillosa y también se clasifica como un grado de meteorización de III a IV.

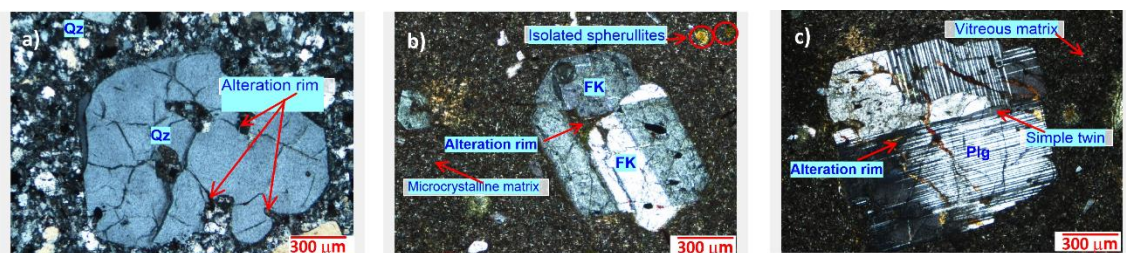


Figura 5.2. Microfotografías de riolitas. Las principales asociaciones minerales son: a) cuarzo (SiO_2), b) feldespato ($(\text{K}, \text{Na}, \text{Ca}, \text{Ba}, \text{NH}_4)(\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_4$), c) plagioclasa ($(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_4$).

5.2. Caracterización de roca por difracción de rayos X para la determinación de abundancia de minerales y petrografía.

En los difractogramas de DRX de rocas riolíticas (Figura 5.2a), se muestran los porcentajes de abundancia de los siguientes componentes: sodio-albita-sílice-albita 52,7%, óxido de cuarzo-silicato 45,6% y potasio-aluminio-sílice 1,7%. La presencia de óxido de sílice es mínima o imperceptible en el porcentaje reflejado. Las dos fuentes principales de Na son la albita y el sanidino, que se identificaron en el análisis de DRX de la muestra de roca riolítica (Fig. 5.3a).

En el difractograma del suelo (Fig. 5.3b), los minerales de las rocas riolíticas se identificaron como anortita, anortoclasa y cuarzo. Además, en todos los casos se obtuvieron las facies cristalinas de las sales correspondientes al mineral natrita.

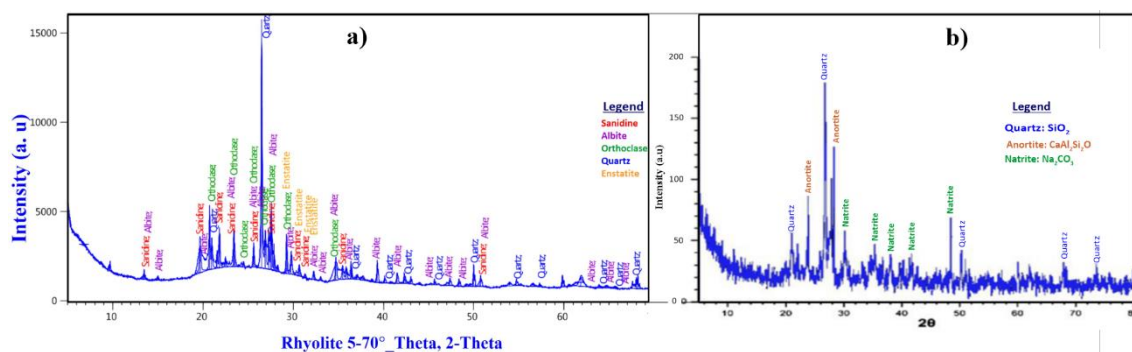


Figura 5.3: a) Es destacable el difractograma de rocas riolíticas, identificándose abundante albita y sanidina, el cuarzo ocupa el segundo lugar en cantidad y la ortoclasa es menos abundante. b) El difractograma del suelo muestra minerales de rocas riolíticas y facies cristalinas de sales correspondientes a natrita.

5.3 Caracterización fisicoquímica y textural del suelo.

El suelo es escaso en rocas riolíticas, particularmente en esta región (Figs. 5.4a, 5.4b y 5.4c). En las laderas, solo se encuentran texturas arenosas, con mayor presencia de suelos arcillosos en las zonas bajas del valle (Figs. 5.5a1, 5.5b1 y 5.5c1). En general, en el valle existen varios tipos de suelos, con predominio de litosoles; en algunos lugares, se encuentran xerófilos, regosoles, luvisoles y, en menor medida, fluvisoles (Thien, 1979). En las partes bajas del valle se encuentra la zona agrícola; las texturas predominantes son franco-arcilloso-arenoso, franco-arcilloso-arenoso, franco-limoso y franco (Fig.5.5).

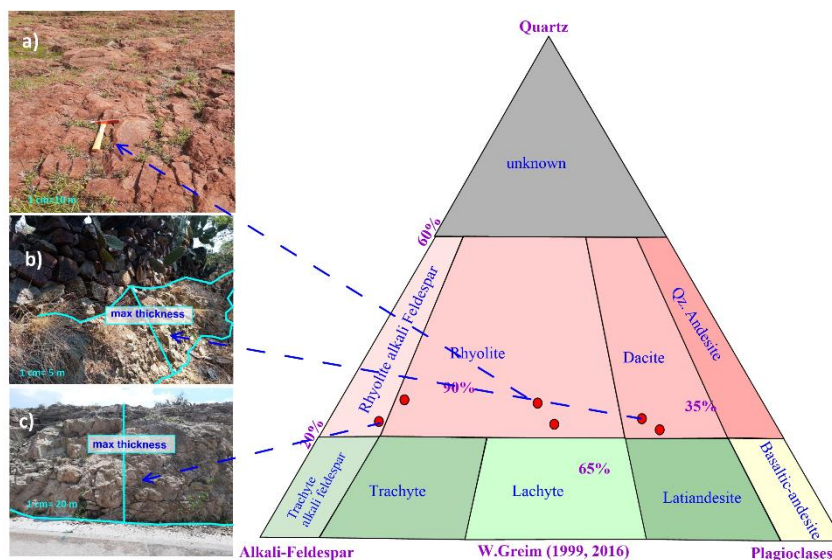
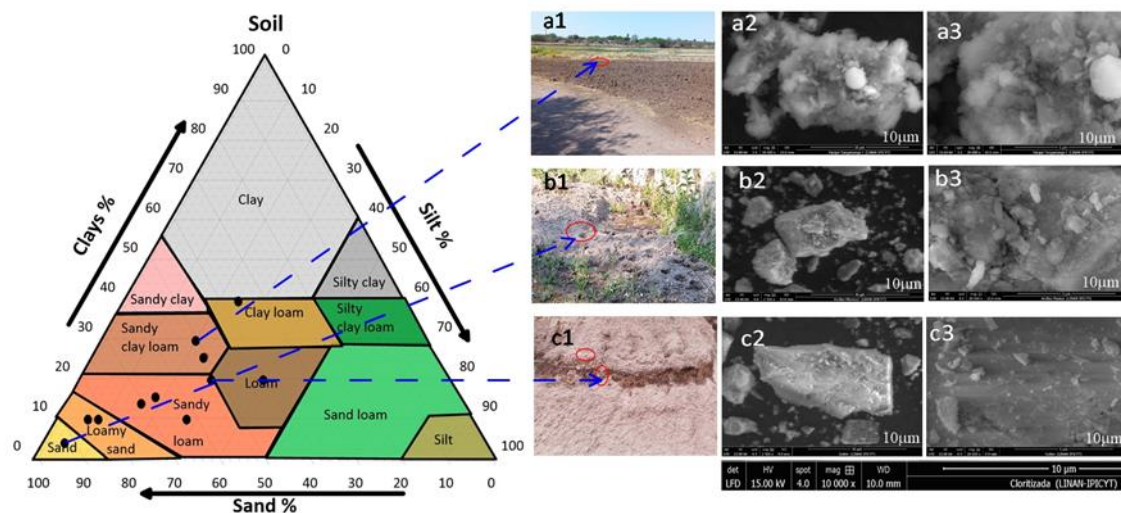


Figura 5.4. Rocas volcánicas expuestas de Tierra Nueva, San Luis Potosí, a) Riolita porfirítica, b) Dacita y c) Riolita AF, de acuerdo con el diagrama de Streckeisen.

La Figura 5.5 (Figs. a2, a3, b2, b3, c2 y c3) muestra micrografías; en las imágenes de SEM se identifican los granos que componen el suelo, así como algunos grupos de cristales delgados y alargados que corresponden a la sal

presente en el suelo, debido al proceso de hidrólisis de los minerales de albita y sanidina, lo que produce suelos sódicos, lo cual representa una amenaza significativa para la agricultura. Ramos et al., 2016, midieron en el área de estudio, a diferentes profundidades del suelo, un pH de 8,75 en los primeros 15 cm y un pH de 9 en 30 cm. Además, calcularon el índice de permeabilidad con valores inferiores al 15 % en ambas áreas. Al mismo tiempo, reportan clasificaciones del índice de presión osmótica (OP) a 15 cm como agua salina permisible y a 30 cm como agua muy salada, con problemas significativos. Según el índice RAS, el agua en el área de estudio se clasifica como de calidad moderada a mala en términos de sodicidad [Ramos-Leal, et al. 2016]. En este trabajo, se midieron valores de conductividad eléctrica a 15 cm en 3,59 mhos/cm, mientras que a 30 cm es de 1,68 mhos/cm. Se observan sales en el suelo, que asciende por capilaridad con alta evapotranspiración. Estos datos indican la presencia de estrés sódico [Levitt, 1980], que es uno de los factores ambientales más limitantes para el crecimiento vegetal en el área de estudio. Los efectos incluyen retraso del crecimiento, mala germinación, quema de hojas, marchitamiento y posible muerte de las plantas.



La Figura 5.5 muestra el diagrama ternario de la clasificación textural del suelo del personal de la División de Estudios de Suelos (USDA, 1974); seis de las doce clases texturales se muestran a la izquierda. Estos suelos presentan diferentes grados de meteorización: a1) franco arcilloso arenoso, b1) arena y c1) costras de sal precipitada con colores que van del blanco al amarillento y marrón.

En general, en el Valle están presentes varios tipos de suelo. La mayor parte del valle está cubierta por litosol, en algunas zonas hay xerófilos, regosol y luvisol, y en un porcentaje menor hay fluvisol. Según su textura, los suelos varían entre franco-arenosos, franco-arcillosos, franco-arenosos y franco-arcillosos (figura 5.6, tabla 5.3 y 5.4).

Dentro de la descripción de los tipos de suelos se tomaron 11 muestras (Tabla 3-4, Figura 11) de 1 kilogramo aproximadamente de las zonas agrícolas a la profundidad alcanzada por las raíces de la planta; cada muestra de suelo se

determinó por el método de toque de textura (Thien 1979), así como la conductividad y el pH, con una profundidad de 0 a 30 cm y 0-60 cm.

Tabla 5.3. Registro de datos sobre suelos en el municipio de Tierra Nueva, S.L.P. profundidad de 0 a 30 cm.

Muestra	X	Y	Z	Prof.	pH	CE	arena	limo	arcilla	Textura
TN- 1	332703	2399330	1754	0-30	7.11	0.3	90	5	5	Are
TN-2	332828	2399487	1748	0-30	7.74	0.74	60	15	25	Faa
TN-3	332952	2399643	1741	0-30	7.33	0.26	60	15	25	Fare
TN-4	332298	2399141	1755	0-30	7.12	0.5	90	5	5	Are
TN-5	332422	2399298	1752	0-30	8.56	1.31	90	5	5	Al
TN-6	332566	2399414	1748	0-30	8.11	0.28	90	5	5	Are
TN-7	332671	2399611	1745	0-30	7.8	0.26	90	5	5	L
TN-8	332795	2399768	1741	0-30	7.8	0.46	80	10	10	Af
TN-9	332390	2399579	1751	0-30	8.12	0.8	90	5	5	Are
TN-10	332141	2399265	1757	0-30	7.69	0.31	90	5	5	Are
TN-11	332266	2399422	1754	0-30	8.57	0.63	30	35	35	Farc

Tabla 5.4. Registro de datos sobre suelos en el municipio de Tierra Nueva, S.L.P. profundidad de 0 a 15 cm.

Muestra	X	Y	Z	Prof.	pH	CE	Arena	Limo	Arcilla	Textura
TN- 1	332703	2399330	1754	0-60	8.21	0.34	90	5	5	L
TN-2	332828	2399487	1748	0-60	7.7	0.23	80	10	10	Af
TN-3	332952	2399643	1741	0-60	8.23	0.35	60	15	25	Faa
TN-4	332298	2399141	1755	0-60	7.94	0.31	65	20	15	Fare

TN-5	332422	2399298	1752	0-60	8.15	0.38	80	10	10	Af
TN-6	332566	2399414	1748	0-60	7.47	0.36	90	5	5	Are
TN-7	332671	2399611	1745	0-60	7.48	0.29	90	5	5	Are
TN-8	332795	2399768	1741	0-60	8.1	0.33	60	15	25	Faa
TN-9	332390	2399579	1751	0-60	7.61	0.75	60	15	25	Al
TN-10	332141	2399265	1757	0-60	8.06	0.38	90	5	5	Are
TN-11	332266	2399422	1754	0-60	7.38	0.24	60	15	25	Faa

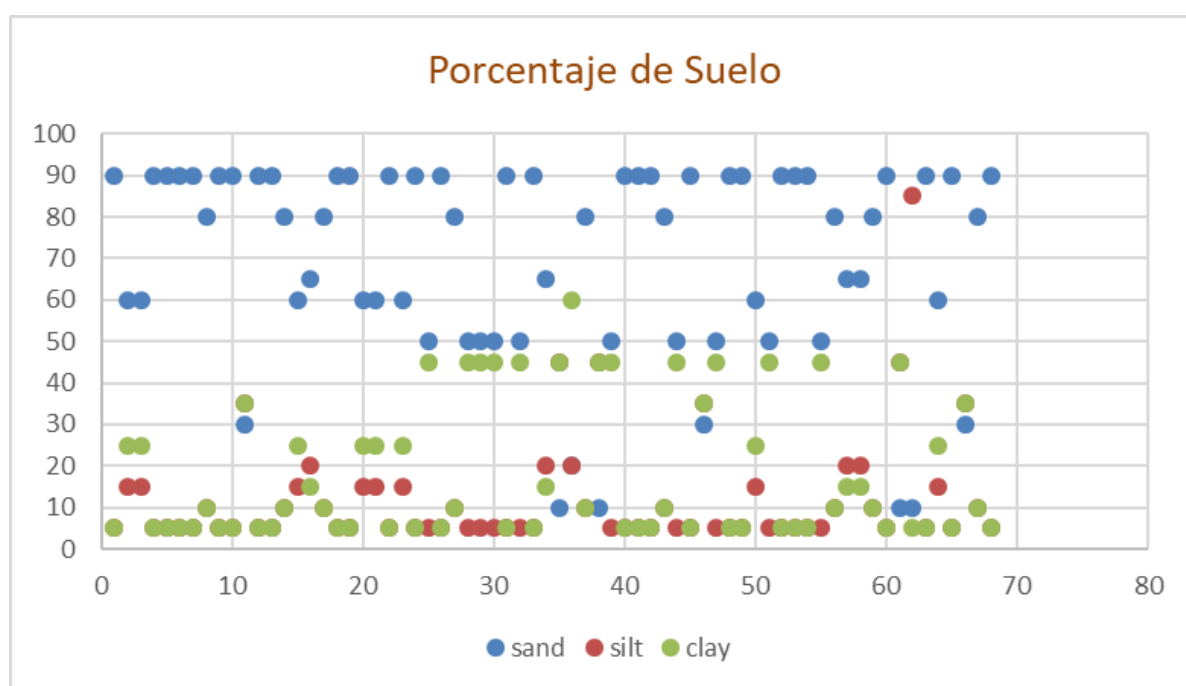


Figura 5.6. Arenas, limos y arcillas en porcentaje de suelos presentes en el municipio de Tierra Nueva, S.L.P.

5. 4 Caracterización hidrogeoquímica del agua.

Los pozos de este estudio tienen profundidades comprendidas entre 5 y 30 m (Fig. 5.7) a lo que las norias, río, estanques son relativamente someros. para

análisis hidrogeoquímicos e isotópicos los parámetros fisicoquímicos se tomaron *in situ*: pH, temperatura, conductividad eléctrica (EC), oxígeno disuelto (OD), sólidos totales disueltos (STD), alcalinidad (Alk), coordenadas (con un multiparametro modelo HI 98194), proceso que permitió obtener los resultados siguientes de la tabla 5.5.

Tabla 5.5. Estadísticas de parámetros fisicoquímicos de aguas subterráneas en Tierra Nueva, S.L.P.

	OD (%)	ORP	pH	CE (mS/cm)	STD (g/l)	ALK
Min	1.5	178.6	6.62	225	110	1
Max	146.3	748.1	9.04	1429	714	672
Promed	52.3136364	319.704545	7.52090909	711.363636	355.681818	208.370455
Mediana	47.6	266.55	7.33	740	369.5	175.5
Desv	38.9713851	149.603057	0.59521032	324.81226	162.159941	194.304608

Los resultados del análisis químico de estas muestras se presentaron en el diagrama trilineal de Piper ([Piper y Garrett, 1953](#)).

Este diagrama de Piper está dominado por tres familias donde se observa una tendencia de tres familias de agua, la primera con agua bicarbonatada cálcica (II-CaHCO₃) la segunda tiene una tendencia de agua bicarbonatada cálcico-sódica (III-NaCaHCO₃) para culminar con la tercera tendencia bicarbonatada sódica (VI-NaHCO₃). Esta última es el agua abundante en nuestro punto crítico número 15 que se muestra en las Figuras. 5.7 dentro de los gráficos, esto hace inferir ese aumento en la sodicidad del agua. Las fases hidroquímicas Ca-HCO₃ están relacionadas con la interacción de agua recientemente infiltrada. Los tipos de agua Na-HCO₃ son probablemente el resultado de la meteorización de rocas subyacentes que son predominantemente ricas en Na⁺ así como de reacciones de intercambio iónico. Mientras que los tipos de agua Na-Ca-HCO₃ pueden

deberse a una mezcla con Ca-HCO₃ agua de facies hidroquímicas e intercambio iónico.

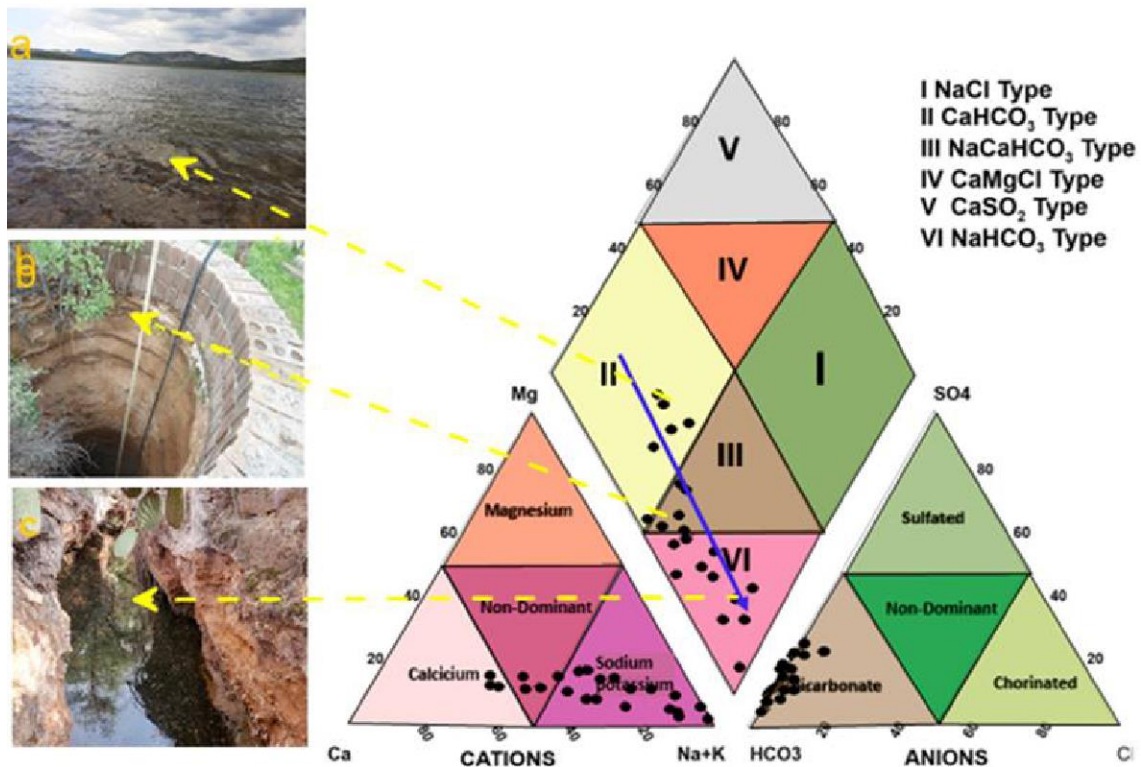


Figura 5.7. Diagrama de Piper en los que se identifican las principales fases hidroquímicas de las muestras de agua subterránea.

5. 4.1 Interacción agua-roca (Hidrólisis).

Los factores que influyen directamente en la alteración son la humedad y la temperatura. En diversos estudios se ha reportado que, en climas áridos, la

arcilla predominante será del tipo illitesmectita (Appelo y Postma, 1993; Parkhurst y Appelo, 1999).

En la zona de estudio la intensa actividad agrícola contribuye a crear condiciones húmedas para la alteración de los minerales por reacción de hidrólisis donde los minerales de silicato en solución acuosa, se disocia en los iones H^+ y OH^- los cuales son selectivamente consumidos, y los iones K^+ , Na^+ , Ca^{2+} son transferidos a la composición del agua subterránea (Appelo y Postma, 1993; Parkhurst y Appelo, 1999).

De acuerdo con la mineralogía de la zona de estudio se pueden producir las reacciones que se muestran en la Tabla 5.6. donde los iones son liberados al suelo y en el agua subterránea, dejando su firma hidrogeoquímica como agua de tipo $Na-HCO_3$ que predominan en el acuífero del río Jofre. Se observa que el ion Na^+ también aumenta durante el proceso de intercambio iónico con arcillas.

Aunque la liberación de Na^+ de las rocas riolíticas por alteración natural puede ocurrir en un amplio rango de escalas de tiempo, desde meses a miles o decenas de miles de años (Yokoyama, 2015; Raj, 2023), una vez liberado este ion, se incorpora al agua, por intercambio iónico o la concentración por la evaporación que dan lugar a la salinización del agua y el suelo (Bedoui *et al.*, 2008).

Tabla 5.6. Conjunto de fases hidrogeoquímicas que se consideraron en la interacción agua-roca y referencias bibliográficas.

Phase	Reaction	Ref

Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 8\text{H}_2\text{O} = \text{Na}^+ + \text{Al}(\text{OH})_4^- + 3\text{H}_4\text{SiO}_4$	1
Sanidine	$(\text{K},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8 (\text{Na}_{0.56}\text{K}_{0.40}\text{Ca}_{0.01})_{\Sigma=0.97} (\text{Al}_{0.97}\text{Fe}^{3+}_{0.03})_{\Sigma=1.00} \text{Si}_{3.01}\text{O}_8$	1
Quartz	$\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_4\text{SiO}_4$	1
Kaolinite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 6\text{H}^+ = \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_4\text{SiO}_4 + 2\text{Al}^{3+}$	1
Feldspar	$2\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{H}^+ + 9\text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{K}^+ + 4\text{H}_4\text{SiO}_4$	1
Plagioclase	$\text{Na}_{0.62}\text{Ca}_{0.38}\text{Al}_{1.38}\text{Si}_{2.62}\text{O}_8 + 5.52 \text{H}^+ + 2.48\text{H}_2\text{O} = 0.62\text{Na}^+ + 0.38\text{Ca}^{+2} + 1.38\text{Al}^{+3} + 2.62\text{H}_4\text{SiO}_4$	1
Microcline	$0.013\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8) + 0.013\text{CO}_2 + 0.0195\text{H}_2\text{O} = 0.065\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 0.013\text{K}^+ + 0.013\text{HCO}_3^- + 0.026\text{SiO}_2$	1
Fase	Reacción	Ref
Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 8\text{H}_2\text{O} = \text{Na}^+ + \text{Al}(\text{OH})_4^- + 3\text{H}_4\text{SiO}_4$	1

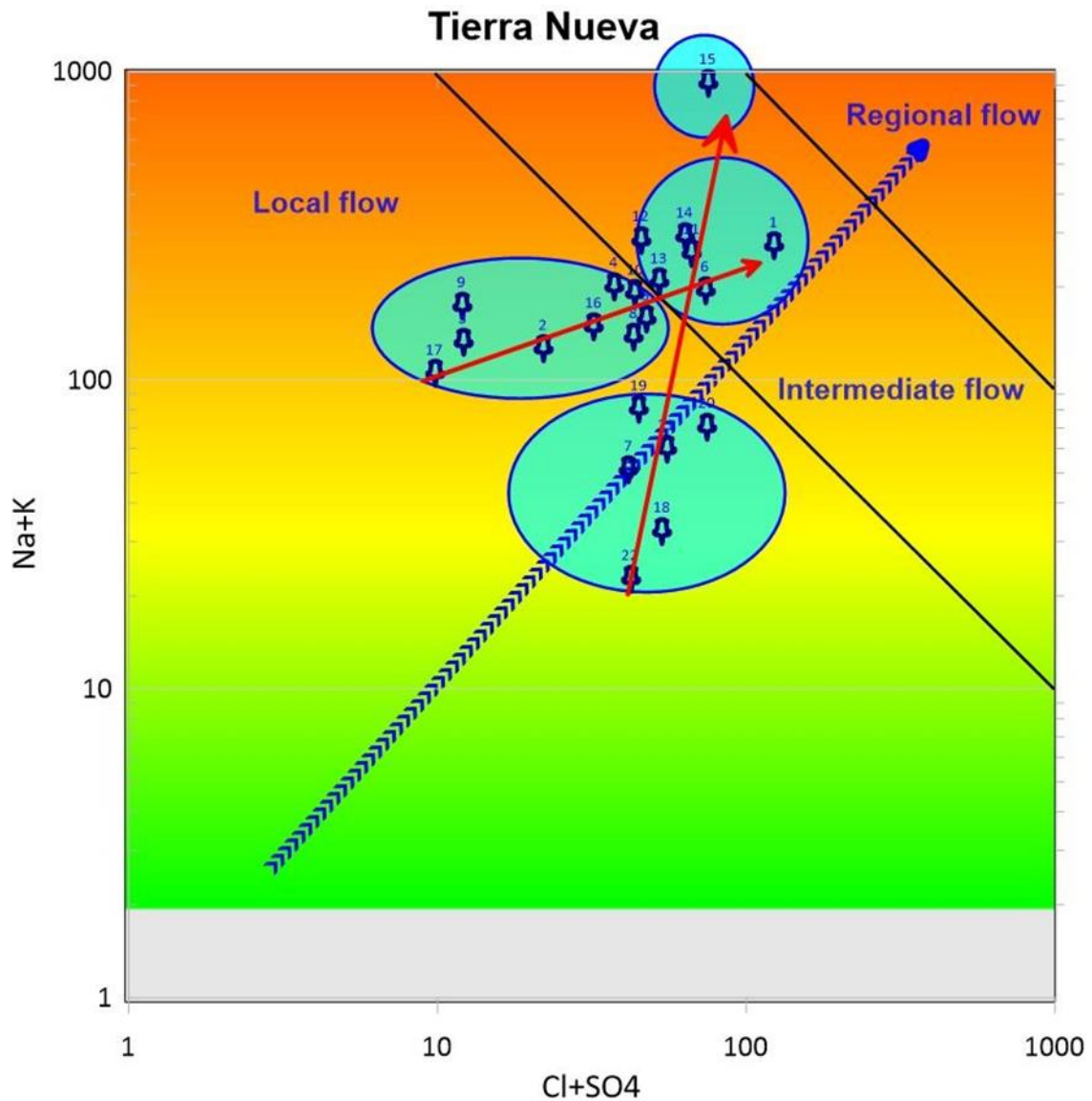
Ortosa	$2 \text{ KAlSi}_3\text{O}_8 + 9\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 4\text{Si}(\text{OH})_4 + 2\text{K}^+$	2
SiO ₂ (a) Quartz	$\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_4\text{SiO}_4$	1
Kaolinite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 6\text{H}^+ = \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_4\text{SiO}_4 + 2\text{Al}^{3+}$	1

1. [Parkhurst and Appelo \(1999\)](#)

Mediante unos análisis petrográficos y de DRX, estos minerales fueron identificados comprobando que el proceso principal es la hidrólisis (Tabla 5.6). En la reacción de hidrólisis de la albita, el Na⁺ se incorpora al agua subterránea, y se forman arcillas como caolinita, montmorillonita, gibbsita ([Parkhurst y Appelo 1999](#)). En el mineral de biotita, se liberan K⁺ y Mg²⁺. Mientras que, por una reacción de REDOX la magnetita, el Fe⁺² pasa a Fe³⁺ al interactuar con el agua subterránea; como evidencia de este proceso en el área de estudio, se presenta el pórfido rojo (sangre de pichón) que es utilizado como material ornamental en las casas.

En el diagrama de Mifflin (figura 5.8) se observan 4 grupos principales el primero abarca los puntos 22, 21, 20, 19, 18 y 7 presentando un flujo local además de tener como característica principal una reciente infiltración según el análisis hidrogeoquímico de muestras, siendo la Presa La Muñeca la fuente de abasto del flujo con dirección SW-NE, en el grupo dos se integra por los puntos 17, 16, 15, 10, 9, 8, 5, 4, 3, y 2 con tendencia de flujo local a flujo intermedio teniendo como característica aporte de iones de Na⁺ en sus análisis hidrogeoquímicos esto por la interacción agua roca, distancia recorrida y presencia de zonas de

agricultura, el grupo tres está conformado por los puntos 14, 13, 12, 11, 6 y 1 aquí se localiza en el flujo intermedio registrando un incremento de sodicidad favorecido por la topografía del lugar siendo la parte baja de la zona.



5.8. Diagrama de Mifflin donde se identifican los principales flujos y evolución del agua subterránea.

La figura 5.9.a muestra las rutas evolutivas del comportamiento del SiO₂ y del HCO₃/Na. En la ruta I, se encuentran las muestras 22, 21, 20, 18, 7, y 6; el

comportamiento del SiO_2 con respecto al HCO_3/Na tiene un comportamiento inversamente proporcional; es decir, a medida que disminuye la sílice, aumenta la relación HCO_3/Na en una relación de -0.17, estas muestras están relacionadas con el flujo subterráneo que va desde la presa hasta la zona de descarga del agua subterránea. La ruta II está formada por las muestras 19, 17, 13, 12, 5, 4 y 3, en este grupo también presenta un comportamiento inversamente proporcional a una relación de -0.8, también va en el sentido del flujo. La ruta III está formada por las muestras 1, 2, 8, 9, 10, 11, 14, 15 y 16. Este grupo es directamente proporcional; es decir, a medida que aumenta la sílice, la relación HCO_3/Na aumenta a razón de 1. En este grupo, el flujo converge hacia la muestra 15, situada en la zona de descarga.

La figura 5.9.b muestra la reacción de hidrólisis de la albita, que es la relación SiO_2 respecto a $\text{Na} / (\text{Ca} + \text{Na})$, la ruta evolutiva I, con las muestras 22, 21, 20, 18, 13, 12, 10, 9, 7, 5, 4, y 3, tiene una relación directamente proporcional a un porcentaje de 2,28; es decir, la sílice aumenta mucho más rápido que la relación $\text{Na} / (\text{Ca} + \text{Na})$. La ruta II, con 16, 15, 14, 11, 9, 8, 2 y 1, presenta un comportamiento inversamente proporcional a un porcentaje de -0,62; es decir, a medida que disminuye la sílice, aumenta la relación $\text{Na} / (\text{Ca} + \text{Na})$. Las rutas III, 6 y 19 tienen una relación directamente proporcional a un porcentaje de 1,2; es decir, la sílice aumenta mucho más rápido que la relación $\text{Na} / (\text{Ca} + \text{Na})$.

En la Figura 5.9.c, se muestra la relación SiO_2 respecto a Ca^{2+} ; la ruta I, con las muestras 22, 21, 20, 18, 7 y 4, tiene una relación directamente proporcional a una relación de 0,4; es decir, Ca^{2+} aumenta mucho más rápido que la sílice. La ruta II, con las muestras 16, 15, 14, 11, 10, 9, 8, 2 y 1, presenta un

comportamiento directamente proporcional a una relación de 0,12; es decir, el Ca^{2+} aumenta mucho más rápido que la sílice. En la Ruta III, las muestras 3, 5, 6, 12, 13, 17 y 19 tienen una relación directamente proporcional a una relación de -0,4; es decir, el Ca^{2+} aumenta mucho más rápido que cuando disminuye la sílice.

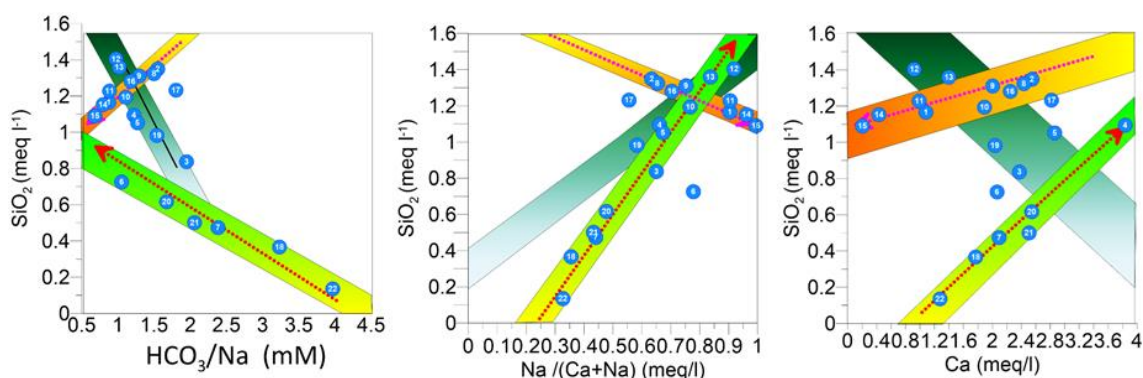


Figura 5.9. Diagramas de dispersión de SiO_2 en relación con los cationes en las aguas subterráneas a) $\text{SiO}_2/(\text{HCO}_3/\text{Na})$, b) $\text{SiO}_2/(\text{Na}/(\text{Na} + \text{Ca}))$ y c) SiO_2/Ca .

La figura 5.10.a muestra la relación de F^- frente a Na^+ , en la que se observan las vías de evolución de las aguas subterráneas (F1, F2 y F3). La evolución se inicia con la muestra 22 (Presa de La Muñeca) con un comportamiento directamente proporcional hasta las coordenadas del punto 15 Morales-Salitre Grande de Na (F1). A partir de este punto, el agua tiene dos vías de evolución, en una, no hay aumento de F^- , y sólo aumenta el Na^+ , posiblemente debido a la interacción agua-roca (riolítica) con un alto contenido en Na^+ (F2). La otra vía evolutiva tiene un aumento significativo de F^- y poco crecimiento de Na^+ , posible interacción con agua de retorno de riego. Esta zona se caracteriza por utilizar apatito $(\text{PO}_4)_3\text{Ca}_5(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ en las muestras 13 y 14 son una antigua galería y

una balsa situadas en la parte baja de zonas de riego probablemente acumulativas (F3).

En la Figura 5.10.b, Cl frente a NO₂ se observan dos rutas evolutivas; en la primera, respecto al Cl⁻, hay un aumento considerable de Cl⁻, lo que sitúa a este grupo de muestras (6, 4, 3, 20 y 15) como un agua más evolucionada por interacción agua-roca. En la segunda ruta evolutiva, se subdivide según su origen con respecto al NO₂ que va desde las muestras 22, 21, 1, 19, 14, 18, 2, 5, y 17 linealmente a través de la localidad de Tierra Nueva con un posible aporte de aguas residuales urbanas, lo que explica el aumento de NO₂. El segundo grupo identificado en este recorrido se encuentra con un bajo contenido en Cl⁻, y un aumento de NO₂ atribuido a su ubicación en zonas de regadío al uso de fertilizantes y retornos de riego; las muestras 10, 11 y 12 presentan la máxima concentración de NO₂, posiblemente debido a la contaminación por vertidos de una explotación avícola.

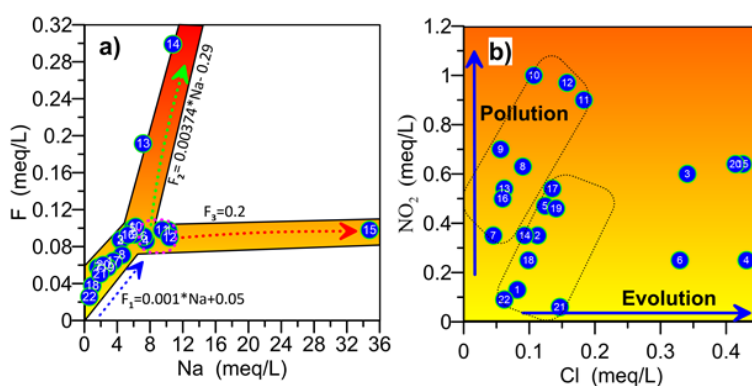


Figura 5.10. Identificación de la evolución, contaminación, evaporación, y mezclas en el acuífero de Tierra Nueva a través de la relación de a) F- versus Na, y b) NO₂ versus Cl⁻.

5. 4.2 Establecer los mecanismos de salinización por sodicidad en el área por medio de isótopos estables.

Algunos investigadores utilizan la relación isotópica ambiental para la interpretación de la interacción agua-roca ([Barth, 2000](#); [Jung et al., 2020](#); [Sankoh et al., 2022](#)). La figura 5.11 es la relación isotópica entre $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, para $\delta^{18}\text{O}$ el mínimo fue de -9,58 (muestra 3), el máximo de -4,33 (muestra 22 de la presa de La Muñeca), y la media de -7,18, con una desviación estándar de 1,37. Mientras que para $\delta^2\text{H}$, el mínimo fue -41,14 (muestra 22 de Presa la Muñeca), el máximo -73,94 (muestra 3), y la media -54,34, con una desviación estándar de 7,8. Se identifican dos rutas evolutivas; la primera está relacionada con la interacción agua-roca con un $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ bajos, lo cual es consistente con el tipo de explotación (pozos 3, 2, 6 y 5). La segunda ruta evolutiva muestra una mayor evaporación desde su origen muestra 22, lo que se interpreta que la presa influye en el acuífero hasta su parte más baja. Los grupos 14, 12, 17, 11 y 16 se identifican como la zona de mezcla en la que sus valores están relacionados con la Línea Meteorica Mundial.

En relación con la línea meteórica mundial (GWWL) definida por [Craig \(1961\)](#) $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$, la línea de evaporación del acuífero de Tierra Nueva ($\delta^2\text{H} = 3.27 \cdot \delta^{18}\text{O} - 28.9$), muestra una desviación de 22° respecto a la línea meteórica mundial, esta línea desviada representa la línea de evaporación del acuífero de Tierra Nueva. La línea de evaporación interseca la línea meteorológica mundial a -8,5 en $\delta^{18}\text{O}$ y a -63 en $\delta^2\text{H}$. Cerca de estas coordenadas se encuentran las muestras 17, 16, 14, 13 y 12. Algunos ejemplos (3, 2, 6, y 5) no se ajustan a esta tendencia y presentan un desplazamiento horizontal (línea verde) respecto a la

GWTL (Craig, 1961); este comportamiento está relacionado con la interacción agua-roca. Cabe mencionar que la dirección de la flecha roja indica la evolución del agua subterránea desde la presa La Muñeca. Este comportamiento también puede interpretarse como un efecto de mezcla entre el agua de la presa y el agua subterránea del acuífero de Tierra Nueva, en el que el flujo procedente de debajo de la presa se mezcla con el agua subterránea (Jung et al., 2020).

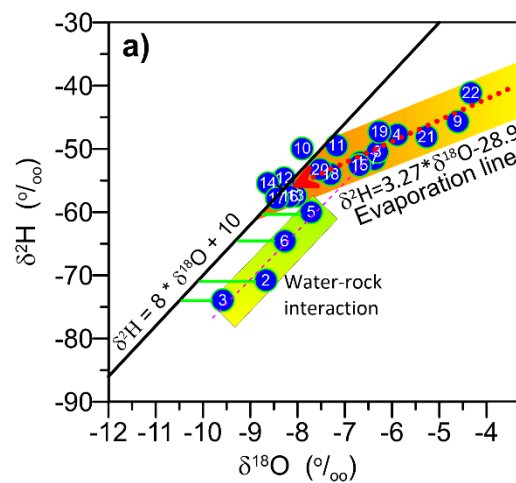
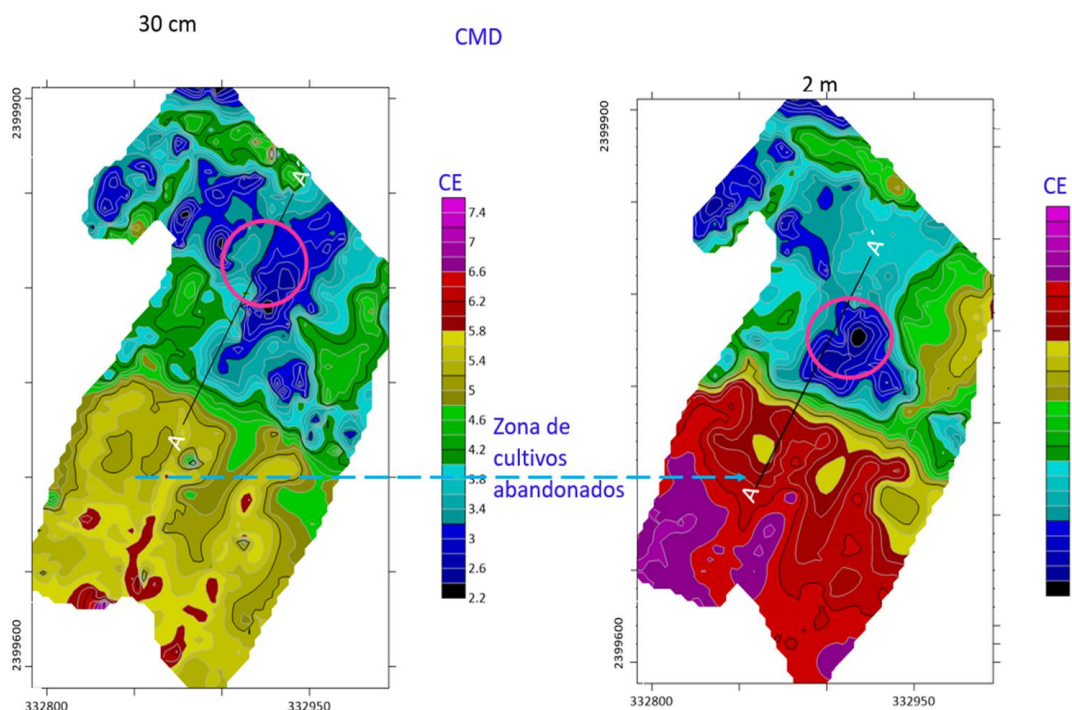


Figura 5.11. Relaciones entre (a) $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ donde se muestran las influencias de la evaporación y la interacción agua-roca en el agua subterránea.

5. 5 Determinación de horizontes salinos por métodos geofísicos Medidor de Conductividad Electromagnética (CMD).

Por medio medidor de conductividad electromagnética permitió identificar la zona de mayor concentración de salinidad, de manera indirecta y no invasiva se logra observar la profundidad de nuestro punto 15 siendo la afectación del suelo en forma de cónica a dos profundidades los análisis uno de 30 cm y el segundo a 2.10 metros de profundidad (Figura 5.12 y tabla 5.7) con un modelo

reconstruido más completo desde el suelo al exterior de las plantas como evidencia de afectación.



15

Figura 5.12. CMD método geofísico de análisis del subsuelo a dos profundidades con concentración de salinidad en el punto de muestreo en campo número 15 con presencias de muerte regresiva vegetal.

5. 6 Identificar el impacto de la salinidad del agua y suelo en las plantas.

Se observa dos vertientes de asimilación a condiciones ambientales de los vegetales y los puntos de referencia nuevamente son Presa La Muñeca donde los índices de clorofila se presentan de buenas condiciones teniendo lo necesario del suelo en conjunto con la calidad del agua en la cual se rodean las plantas, prosiguiendo en el transecto (Figura 5.13, tabla 5.7).

Tabla 5.7. Registro de campo en recolección de polen de Mezquite (*Prosopis spp.*) y Huizache (*Vachellia farnesiana*) en el transecto de la Presa La Muñeca a la comunidad de Hacienda vieja tomando las muestras más cercanas al flujo de agua principal.

Nº. Muestra	Lugar	Imagen	Planta	Polen	X	Y	Z
MRC-1	Presa La Muñeca	2	Huizache	Si	339681	2392329	1845
MRC-2	Presa La Muñeca	2	Huizache	Si	339681	2392329	1842
MRC-3	Arroyo Presa La Muñeca	2	Huizache	Si	339680	2392327	1837
MRC-4	Pozo 1	2	Huizache	Si	337748	2396913	1785
MRC-5	Barrio de Santiago	2	Huizache	Si	337748	2396913	1785
MRC-6	Piquín	2	Mezquite	Si	333094	2399724	1759
MRC-7	Salitre Grande	2	Mezquite	Si	332951	2399761	1749
MRC-8	Salitre Grande	2	Mezquite	Si	332960	2399767	1749
MRC-9	Hda. Vieja	2	Mezquite	Si	333294	2401713	1737

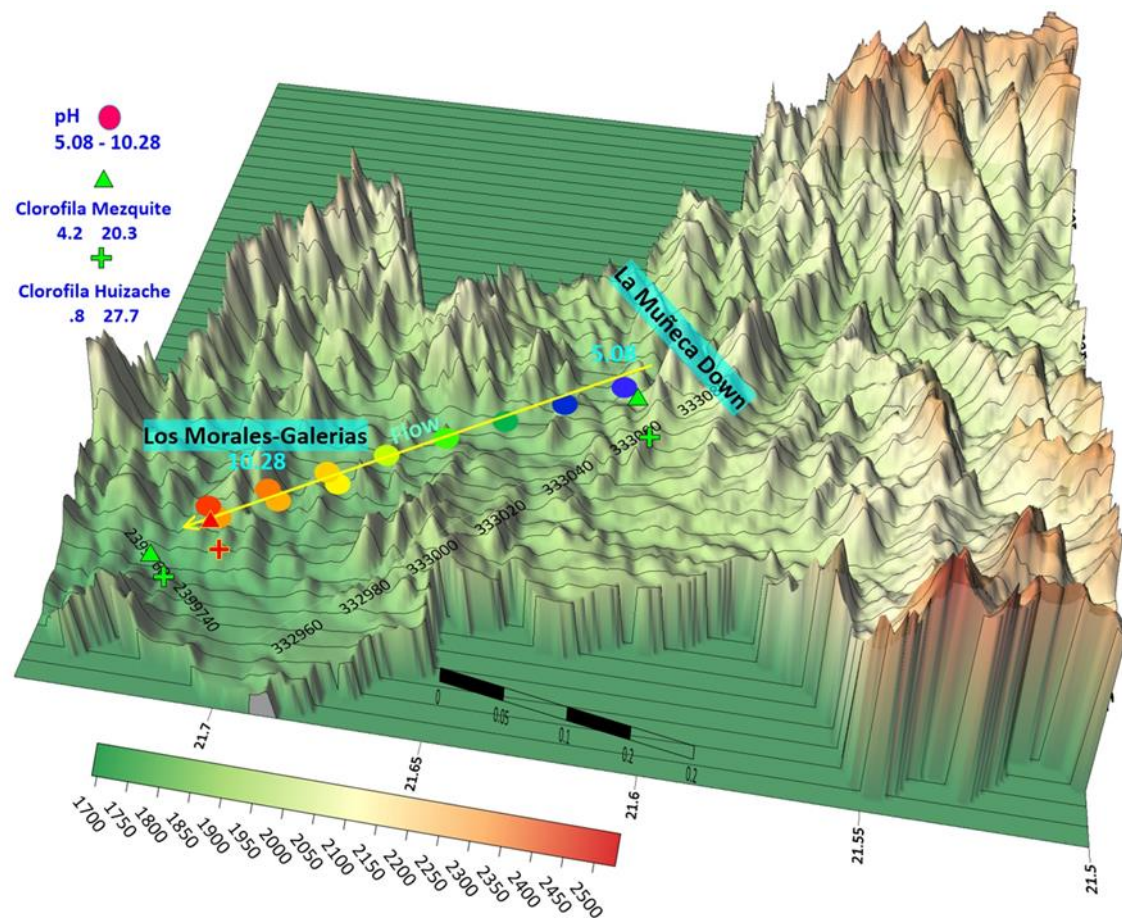


Figura 5.13. Perfil Presa La Muñeca- Hacienda Vieja indicativos y coincidencia de pH, Índice de clorofila de Mezquite (*Prosopis spp.*) y Huizache (*Vachellia Farnesiana*), con colores de semáforo que va verde valores aceptables a rojo valores fuera de rango aceptable.

En la zona anómala se observa un contraste abrupto en las condiciones de vida de las plantas, debido al incremento en la sodicidad del suelo, superando los niveles permisibles en la [NOM-127](#). Esto se refleja en los bajos índices de clorofila, los cuales fueron prácticamente indetectables El pH del agua y del suelo es elevado, alcanzando valores por encima de 10 unidades, lo que indica una calidad hídrica no apta para el consumo humano ni para la agricultura.

El exceso de sodio en el sitio 15 se ve intensificado por un alta de evaporación, evapotranspiración y movimiento capilar, lo cual se manifiesta en la vegetación secundaria (figura 5.14) y en un proceso de muerte regresiva en los árboles.



Figura 5.14. Capilaridad (exudaciones) en pastos, plantas de humedal en el punto 15 Los Morales con las tonalidades blanquecinas indicativo de concentración de sal.

La muerte vegetal inicia desde las partes más externas, específicamente en los tallos donde la acumulación extrema de sales en el proceso osmótico induce a la planta a excretarlas. Como resultado, se observan grietas en los tallos, a través de las cuales se secreta el exceso de sal; estas áreas presentan coloración oscura o negra, atribuible a quemaduras salinas.

Además, se registra una abundante presencia de *Tillandsia recurvata* sobre los individuos de Mezquite y Huizache, lo cual, junto con la presencia de puntas secas, se interpreta como un indicador de estrés severo y muerte regresiva en la vegetación.

En el último recorrido la salud vegetal fue notablemente mejor (Figura. 5.15), con una coloración verde intenso, altos índices de clorofila detectados y ausencia de *Tillandsia recurvata*., Este mejoramiento podría estar relacionado con un proceso

de purificación natural del agua a lo largo de su recorrido, así como con una disminución de la salinización, favorecida por las condiciones del suelo, el cual muestra una transición de materiales de roca-arcilla hacia texturas más arenosas.

5.6.1 mortalidad regresiva en huizaches (*Acacia farnesiana*) y mezquites (*Prosopis spp.*)

Se han identificado las consecuencias del estrés por sodicidad en las aguas subterráneas sobre el mezquite (*Prosopis spp.*) y el huizache (*Vachellia farnesiana*) en el área de estudio, a pesar de que estas especies son conocidas por su resiliencia en ambientes áridos y su capacidad para mantener los niveles de clorofila bajo estrés en otras especies, como lo mencionan diversos autores ([Najla, et al., 2009](#); [Djanaguiraman, M., & Prasad, P. V. 2012](#); [Viera-Silva, D, et al., 2016](#); [Sauceda, J. U, et al; 2008](#)).

Con el medidor portátil de clorofila (SPAD-502; Índice de contenido relativo de clorofila) en las especies de *Mezquite* y *Huizache* en el área de estudio, se ha revelado que estas especies se están viendo afectadas, posiblemente por el exceso de sales de sodio en el suelo y el agua de la región, lo que ha causado una mortalidad regresiva de los árboles en algunos lugares, como se describe a continuación. En las zonas cercanas a la presa, los valores promedio de clorofila en mezquite y Huizache son de 18.65 y 24 (SPAD), respectivamente (Tabla 5.9, Figuras 5.15a y b), donde los árboles presentan colores y estructuras saludables ([Sauceda, J. U, et al; 2008](#)).

En las zonas intermedias del área de estudio, se observa marchitez y cambios en el color del tallo y el follaje en ambas especies, con valores promedio de

clorofila de 5.41 y 7.8 SPAD, respectivamente (Tabla 5.9, Figuras 5.15a y b). En otros estudios, este proceso se identifica como clorosis, que representa la falta de clorofila, seguida de un oscurecimiento de los tallos, comenzando desde las puntas (Jia, Y. X, *et al.*, 2008; Misra, V, *et al.*, 2021; Wakeel, A. 2013). En la zona agrícola, con los niveles más altos de salinidad en agua y suelo, se detectaron ejemplares con mortalidad regresiva y valores de clorofila de 1.17 SPAD en Huizaches y 7.1 SPAD en Mezquites). En respuesta a la alta presión osmótica, se forman nódulos en la especie a través de los cuales se eliminan las sales de agua (Tabla 5.9, Figura 5.15a y b). En el Huizache, se observa agrietamiento por donde brota la savia, con características salinas que producen quemaduras en los troncos, así como el estrangulamiento de los extremos del huizache, impidiendo su desarrollo y causando su mortalidad regresiva (material suplementario). Diversos estudios han reportado que las partes cercanas a los brotes presentan nódulos agrietados generados por estrés fisiológico y metabólico (Don, K. K. G, *et al.*, 2010; Hualpa-Ramírez, E, *et al.*, 2024). En las gramíneas, se observa la excreción de sales por las hojas (Morris, L., Yun, K., Rutter, A., Zeeb, B. A. 2019; Maeda, Y. 2019; Yu, L, *et al.*, 2023), fenómeno que también se observa en el área de estudio.

Tabla 5.8.- Valores de los parámetros fisicoquímicos en el agua subterránea y valores promedio de los índices relativos de clorofila en las especies de mezquite (*Prosopis spp.*) y huizache (*Vachellia farnesiana*) en tres áreas.

	Zone 3	Zone 2	Zone 1
--	--------	--------	--------

CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	3810	350	217
pH	9.24	7.7	8.32
Na (mg/L)	800	22.41	14.26
* <i>Prosopis spp</i>	7.1	12	18.65
* <i>Acacia farnesiana</i>	1.5	6.1	24

CE Conductividad eléctrica, * SPAD (Índice de contenido relativo de clorofila) *

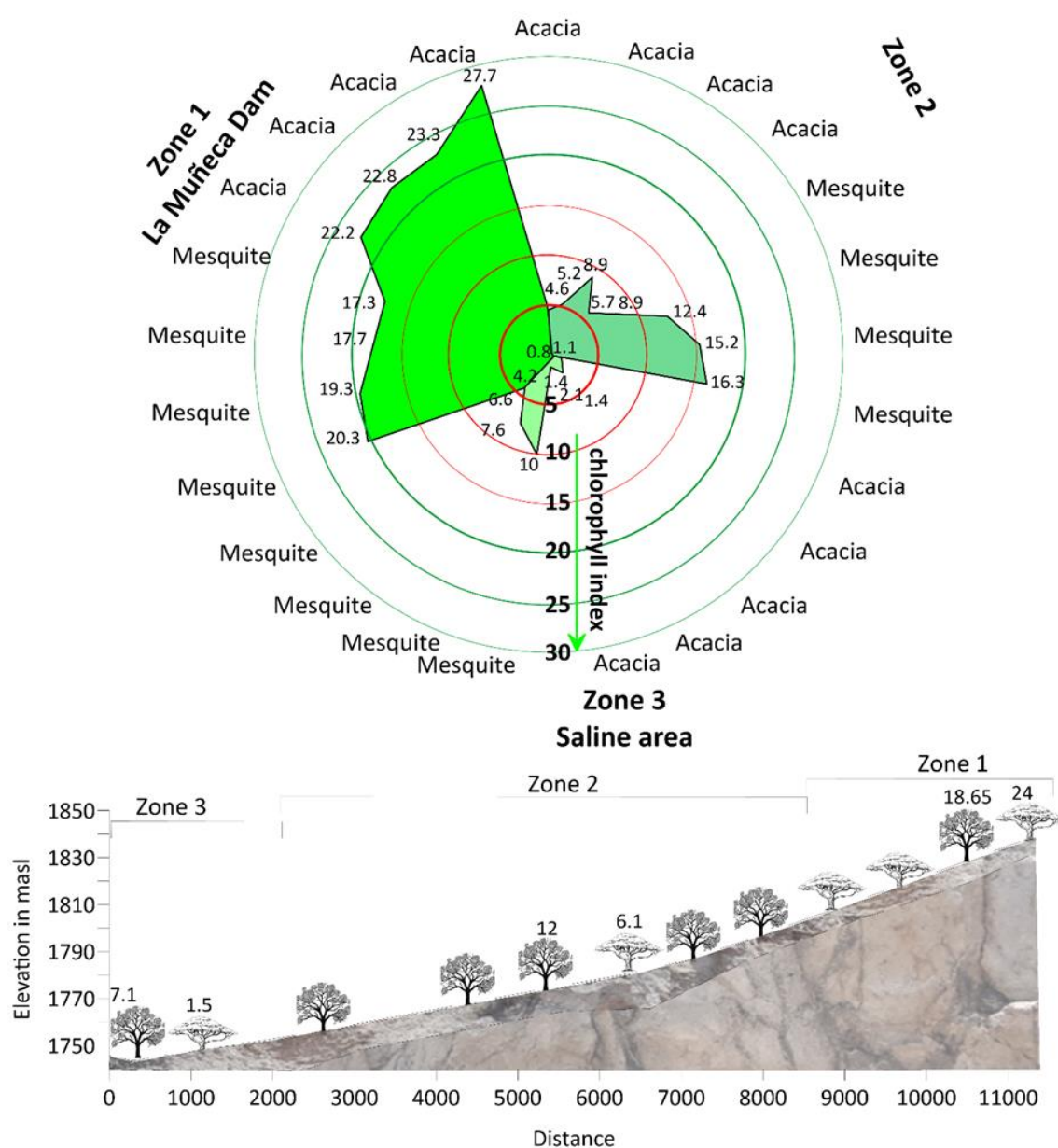


Figura 5.15. a) Gráfica radial de los índices relativos de contenido de clorofila en tres zonas. b) Perfil altitudinal con las especies de mezquite (*Prosopis spp.*) y huizache (*Vachellia farnesiana*), que muestra el índice relativo de contenido de clorofila.

5. 7 Análisis de datos hidrogeoquímicos mediante HCA y PCA

El dendrograma es el principal resultado del HCA realizado en las 22 muestras de agua subterránea (Figura 5.16). Se observa una clasificación de conglomerados de cuatro muestras primarias con base en una observación visual dentro del dendrograma, mostrando un valor de coeficiente de correlación de Cophen de 0.92, indicando que los conglomerados son muestras con procesos evolutivos modificados. El dendrograma resultante muestra cuatro grupos principales (C1–C4): C1 (15), C2 (1, 11, 12, y 14), C3 (2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 13, 16, y 17), y C4 (27, 18, 19, 20, 21, y 22). Las observaciones del dendrograma revelan brechas muy cortas entre los cuatro grupos principales atribuidos a la influencia de la actividad antropogénica en el área de estudio. C2-C3 parecen similares ya que ambos están estrechamente vinculados y pertenecen a la misma clasificación de agua. Esta evolución está influenciada por el retorno del riego causado por la actividad agrícola en el área. C1 es el menos similar ya que tiene una distancia de enlace más significativa; Estas particularidades se atribuyen al retorno del riego continuo y al tipo de suelo arcilloso que favorece la capilaridad y la precipitación de sales de sodio (Figuras 5.5 b1, b2, b3 y 5.9). C4 es un grupo de aguas que representa una evolución normal, es decir, no se ve impactado por la actividad antropogénica en el área (Figuras 5.9, 5.10a y b; 5.11). Para el análisis de PCA, el primer componente

(PC1) se correlacionó positivamente con HCO_3 (0,85) y Na^+ (0,52), lo que explica aproximadamente el 96,8% de la varianza total en el conjunto de datos. Esto es consistente con el tipo de roca que forma el acuífero, como lo confirman los difractogramas y los procesos hidrogeoquímicos ya descritos. PC2 (2,3%) está determinado por altas cargas positivas en Na^+ (0,69) y SO_4 (0,46%), lo que sugiere una evolución natural en este grupo. Las muestras pertenecientes al mismo grupo de color sugieren el mismo proceso hidrogeoquímico (evolución) y trayectorias de flujo (Fig. 5.16b), por lo que deducimos que estas diferencias se deben al grado de impacto antropogénico en el área (Figura 5.9 y 5.13, Rosa: Ca-Na- HCO_3 , Verde: Na- HCO_3 , Negro: Na-Mg- HCO_3 , y Amarillo; Na- HCO_3).

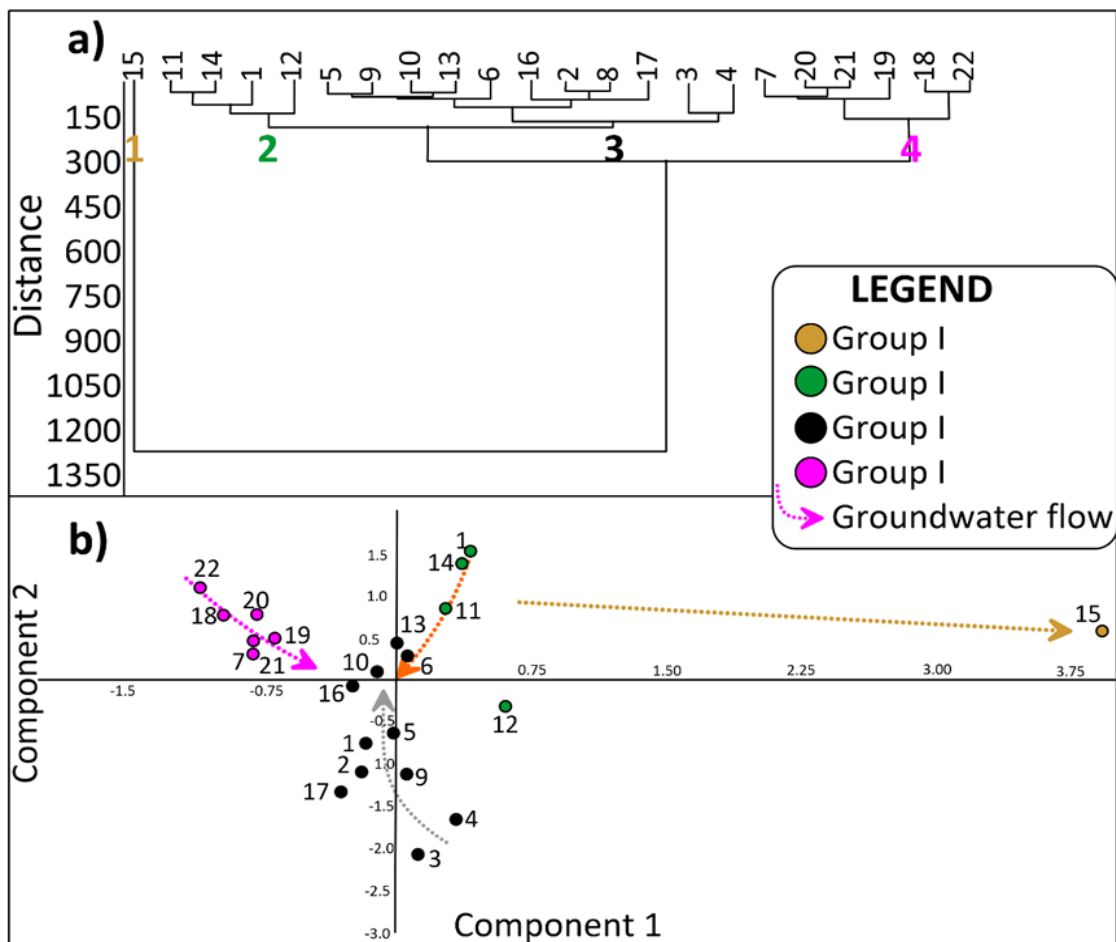


Figura 5.16. Análisis estadístico multivariado de 22 muestras hidrogeoquímicas.

(a) Dendrograma para las muestras de agua subterránea, que muestra la división en cuatro grupos y (b) gráfico de las puntuaciones de los componentes principales para los dos primeros componentes (C1: HCO_3 y Na^+ ; C2: Na^+ y SO_4) para las muestras de agua etiquetadas (rosa: Ca-Mg-HCO_3 , verde: Na-HCO_3 , negro y amarillo: Na-Mg-HCO_3) con un coeficiente de 0,5 para cada grupo.

El agua constituye entre el 80% y el 95% del tejido vegetal, por lo que el estrés hídrico se debe a un bajo suministro de agua. Otra causa de estrés vegetal es la mala calidad del agua y los suelos salinos en la zona de estudio. Estas condiciones del suelo y el agua sódica se han utilizado durante aproximadamente 30 años en regiones agrícolas con riego no tecnificado, que presentan un clima árido y una alta evaporación.

Estos resultados sugieren que la mortalidad regresiva afecta a especies resilientes como el Mezquite (*Prosopis spp.*) y los Huizaches (*Vachellia farnesiana*); el aumento de la sodicidad de las aguas subterráneas afecta su salud, especialmente en zonas con mayor salinidad. Debido a los altos niveles de sodicidad, se forman nódulos y grietas en los árboles en respuesta al estrés osmótico, lo que provoca una mortalidad regresiva en esta especie.

Capítulo VI

6. Conclusiones

Las rocas volcánicas que predominan en el área de estudio son de composición riolítica. Los minerales que forman las rocas riolíticas son predominantemente feldespatos alcalinos. El análisis petrográfico muestra que los minerales presentan grados de meteorización III y IV. La alteración química de los feldespatos alcalinos durante la hidrólisis libera iones de Na, que se incorporan al agua subterránea, dando lugar al origen geogénico de la salinidad del agua subterránea.

Al inicio del proceso evolutivo, las facies hidroquímicas de Ca-HCO_3 se encuentran en menor proporción; están relacionadas con la interacción de la roca con agua recientemente infiltrada. A medida que el agua evoluciona, se generan algunas facies mixtas de tipo Na-Ca-HCO_3 , que relacionan la mezcla con aguas de facies hidroquímicas de Ca-HCO_3 con intercambio iónico. En la zona de descarga de aguas subterráneas, predominan las familias de agua Na-HCO_3 , resultantes de la meteorización de rocas subyacentes con una composición riolítica predominantemente rica en Na. Los análisis hidroquímicos indican tres vías evolutivas predominantes (I, II y III), donde la sílice y la relación HCO_3/Na disminuyen, mientras que el Ca aumenta de forma natural. En la Vía III, el retorno del riego, resultante de la intensa actividad agrícola en la zona árida con altas temperaturas y horizontes arcillosos, facilita la capilaridad en la capa superficial del suelo y su elevada evaporación, lo que resulta en la precipitación de sales.

La sal se acumula cuando el agua subterránea mineralizada se encuentra cerca de la superficie del suelo, evaporándose continuamente, provocando la precipitación mineral en la zona no saturada, contaminando el agua y salinizando el suelo. El impacto más significativo se observa en la Vía III.

El análisis vegetativo permitió observar cambios en la coloración de las flores secas de Huizache y Mezquite, así como un mayor desprendimiento de las anteras en zonas con alta salinidad. No obstante, se detectó una abundancia considerable de polen en dichas estructuras, lo que indica que, a pesar del estrés ambiental, persiste cierta capacidad reproductiva.

La intensa actividad agrícola, las altas temperaturas y la presencia de horizontes arcillosos en el perfil del suelo favorecen el ascenso de agua por capilaridad y posterior evaporación en la superficie. Este proceso promueve la acumulación de sales en el suelo, dando origen a su salinidad de origen principalmente antropogénico.

Los isótopos estables $\delta^2\text{H}$ (deuterio) y $\delta^{18}\text{O}$ evidencian una alta tasa de evaporación, lo que contribuye a la concentración de sales disueltas. Asimismo, mediante el índice de clorofila se identificó una muerte regresiva en individuos de Mezquite y Huizache, atribuida a la saturación salina que supera los umbrales de tolerancia fisiológica de estas especies.

Estos resultados sugieren que la mortalidad regresiva por estrés salino afecta incluso especies nativas como el Mezquite y el Huizache, el aumento de la sodicidad en las aguas subterráneas compromete su salud, especialmente en zonas con mayor acumulación de sales. Como respuesta al estrés osmótico, se observa la formación de nódulos y grietas en los tallos, lo que representa un mecanismo de secreción salina y un síntoma avanzado de deterioro fisiológico. El monitoreo y la gestión adecuada de la calidad del agua subterránea son esenciales

para mitigar estos efectos y conservar los ecosistemas locales.

En conjunto, los distintos métodos aplicados —tanto directos como indirectos— respaldan la hipótesis planteada en esta investigación, evidenciando un incremento significativo de la salinidad principalmente asociada a la presencia de sodio (Na), derivado de una interacción compleja entre factores naturales y actividades humanas.

6.1 Recomendaciones

Tener periodos más largos de observación del territorio estudiado con implementación de inserción de más plantas nativas o locales como son el mezquite y el huizache ya que por lo estudiado tiene una capacidad de resiliencia alta a condiciones extremas y ahora a cantidades altas de saturación de sales, aunado a ello es la vegetación favorecedora a generar un periodo largo de vida

lo cual permite evitar erosión en la zona, retención de la humedad, en determinado momento es utilizado como energía natural en forma de leña o uso en muebles domésticos o ganaderos, y por si fuera poco estas plantas se han adaptado a el cambio climático ya que en una de jornadas de muestreo se tuvo floración atípica en el mes de diciembre que normalmente en la época de primavera es su floración normal, a lo que indica es una planta adaptativa de manera rápida a diferentes condiciones ambientales.

Aunado a ello sería interesante aplicar las técnicas aprendidas a otras zonas generando un comparativo de origen de salinización en el estado, para así tener perspectivas diferentes de los fenómenos naturales que ocurren en la naturaleza.

Referencias

1. Aguilón-Robles, A., Tristán-González, M., Torres-Hernández, J. R., Bustos-Gutiérrez, L. A., & Carrizales-Aguilar, A. (2004). Carta Geológico-Minera Santa María del Río F14-C14. *San Luis Potosí y Guanajuato, escala, 1(50,000)*.
2. Aguirre-Loredo, R. Y. (2025). Mesquite Tree (*Prosopis* spp.): A Native Resource for the Potential for Human Consumption and Healthcare. *Plant Foods for Human Nutrition*, 80(1), 1-7.
3. Ajmi, D., (2009). Saif ud din Handbook of Environmental Chemistry, Volume 3: Anthropogenic Compounds, Remote sensing: Fundamentals, types and monitoring applications of environmental consequences of war Al.
4. APHA, 1998. Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales, 20ª ed. Asociación Estadounidense de Salud Pública (APHA), Asociación Estadounidense de Obras Hidráulicas (AWWA) y Federación Ambiental del Agua (WEF), Washington, DC.
5. Appelo, C. A. J., & Postma, D. (1993). Geochemistry, groundwater and pollution. *Geochemistry, groundwater and pollution*.
6. BARTH, S.R. 2000. Geochemical and boron, oxygen and hydrogen isotopic constraints on the origin of salinity in groundwaters from the crystalline basement of the Alpine Foreland. *Applied Geochemistry*. Vol. 15: 937-952.
7. Boggs, S. (2009). Petrology of Sedimentary Rocks, Second Edition.
8. Borg, E., Truckenbrodt, S.C., Lausch, A., (...), Schmidt, K. (2022). Remote Sensing. Springer Handbooks.
9. BOWEN, N. L. (1928). The evolution of the igneous rocks. – Princeton Univ. Press, Princeton, USA
10. Brady, J.B. (2009). Magma in a beaker: Analog experiments with water and various salts or sugar for teaching igneous petrology. *Canadian Mineralogist*.
11. Carpenter, W. B. (1856). The Microscope and its Revelations. Blanchard and Lea, Philadelphia, pp. 99 -100.
12. CONAGUA. *Inventario Nacional de Presas*. México, D.F.: Conagua, Gerencia del Consultivo Técnico, 2013.
13. Colman, Steven. 1981. "Rock-weathering Rates as Functions of Time". *Quaternary Research* 15: 250-264.

14. Cordero Borboa, A. E. 2000a. "Referencias Recientes para la Historia de la Cristalografía Mexicana", *Boletín de la Soc. Mex. de Física*. vol. 14, núm. 2: 57.
15. Cordero Borboa, A. E. 2000b. "El origen del estudio de los cristales por rayos X en México". *Ciencia y Desarrollo*, vol. XXVI, núm.154, 7.
16. Clasificación USDA 1974. Fragmento de la Leyenda del Mapa Mundial de Suelos", 1974 UNESCO, París.
17. Chen, X., Xu, Z., Yu, L., (...), Jiang, T. (2023). Research advances and hotspots analysis on publications in the *Acta Petrologica Sinica* between 1985 and 2021. *Yanshi Xuebao/Acta Petrologica Sinica*.
18. Chevoratev, 1995. Metamorphism of natural Waters in the crust of whatering, *Geochimical et cosmochimica acta*, vol.8, 22-48 pp.
19. Chuan, L., Zhao-Ning, G., Wen-Ji, Z., Tian-Xiang, C. (2013). Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing, Evolution in Remote Sensing. Canopy water content estimation for typical emerged plant community from simulation worldview-2 data: A case study in Wild Duck Lake wetland, Beijing.
20. Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133(3465), 1702-1703.
21. Datums, P. (1996). Handbook for Transformation of Datums, Projections, Grids and Common Coordinate Systems.
22. Don, K. K. G., Xia, Y. P., Zhu, Z., Le, C., & Wijeratne, A. W. (2010). Some deleterious effects of long-term salt stress on growth, nutrition, and physiology of gerbera (*Gerbera jamesonii* L.) and potential indicators of its salt tolerance. *Journal of plant nutrition*, 33(13), 2010-2027. <https://doi.org/10.1080/01904167.2010.512058>
23. Indices for scaling and predicting weathering-induced changes in rock properties. *Environmental & Engineering Geoscience* 2022; 8 (2): 121–135. doi: <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.8.2.121>.
24. Djanaguiraman, M., & Prasad, P. V. (2012). Effects of salinity on ion transport, water relations and oxidative damage. In *Ecophysiology and responses*

of plants under salt stress (pp. 89-114). New York, NY: Springer New York.
https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4747-4_3

25. Elachi, C., van Zyl, J. (2006). Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing: Second Edition.

26. Erdtman, G. (1960). The acetolysis method. Svensk, Bot. Tidskr. –(1966) Pollen morphology and plant taxonomy. New York, London. pp. 54: 561-564.

27. Fenzl, N. (1988). *Nicaragua: geografía, clima, geología, hidrogeología*. Belém (p. 62). UFPA/INETER/INAN, 1988, Belém, UFPA/INETER/INAN.

28. Fiete, R.D. (2015) Encyclopedia of Optical and Photonic Engineering Second Edition, Remote Sensing.

29. Geological Survey of London (GSL), 1995. The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. Geological Society Engineering Group Working Party Report. Q. J. Eng. Geol. 28, 207 – 242.

30. Genereux D; Wood S J; Pringle C M; (1996) Chemical mixing model of streamflow generation at La Selva Biological Station, Costa Rica. Journal of Hydrology 199 319-330.

31. Gill, 2015. Chemical fundamentals of geology and environmental geoscience (3rd edition). Wiley-Blackwell.

32. Goldich, SS (1938). Un estudio de meteorización de rocas. *El Diario de Geología*, 46 (1), 17-58.

33. Hasenmueller, E. A., Gu, X., Weitzman, J. N., Adams, T. S., Stinchcomb, G. E., Eissenstat, D. M., ... & Kaye, J. P. (2017). Weathering of rock to regolith: The activity of deep roots in bedrock fractures. *Geoderma*, 300, 11-31.

34. Hernández X., E. 1964. Los pastos y pastizales. Ediciones del Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables. Distrito Federal (México) pp. 97-133.

35. Hualpa-Ramirez, E., Carrasco-Lozano, E. C., Madrid-Espinoza, J., Tejos, R., Ruiz-Lara, S., Stange, C., & Norambuena, L. (2024). Stress salinity in plants: New strategies to cope with in the foreseeable scenario. *Plant Physiology and Biochemistry*, 108507. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108507> [Get rights and content](#)

36. Jia, Y. X., Sun, L., He, F., Wan, L. Q., Yuan, Q. H., Li, X. L. (2008). Analysis of effects of salt stress on absorption and accumulation of mineral elements in

elymus spp. Using atomic absorption spectrophotometer. *Guang pu xue yu Guang pu fen xi*= *Guang pu*, 28(12), 2984-2988.

37. Jia, J.-W., Yin, S.-P., Zhao, H.-J., Zhang, H.-R. (2023). Analysis of data and research topics based on publications in *Acta Petrologica et Mineralogica* from 1982 to 2022. *Acta Petrologica et Mineralogica*.

38. Jung, S., Lee, J., Park, Y. K., Kwon, E. E. (2020). Bioelectrochemical systems for a circular bioeconomy. *Bioresource Technology*. 300: 122748.

39. Kaneva, E., Radomskaya, T., Shendrik, R., Chubarov, V., & Danilovsky, V. (2021). Potassic-hastingsite from the Kedrov district (East Siberia, Russia): Petrographic description, crystal chemistry, spectroscopy, and thermal behavior. *Minerals*, 11(10), 1049.

40. Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., & Aranda-Gómez, J. J. (1982). Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del Estado de San Luis Potosí. *Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico*, 85, 208.

41. Labarthe, G., Tristán, M. y Aguillón, A., 1984, Cartografía geológica, Esc.: 1:50, 000, Hoja Salitrera, S.L.P.: Inst. de Geol. Y Metal., Univ. Aut. De S.L.P., Folleto Técnico N°. 94, 85 p.

42. Lázaro, E. R., Rebolledo, E. S., Sedov, S., Barceinas, H., Martínez, R. L., Vergara, B. C., ... & Calmus, T. (2019). Paleopedogénesis, sedimentación y evolución geomorfológica holocénica en el sistema fluvial del Arroyo Tinajas, Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 36(3), 378-392.

43. Laffly, D. (2020). TORUS 2 - Toward an Open Resource Using Services: Cloud Computing for Environmental Data, A brief history of remote sensing.

44. Lifeder. (29 de marzo de 2023). Bosque de pino-encino. Recuperado de: <https://www.lifeder.com/bosque-de-pino-encino/>.

45. Lindbo, D.L., Kozlowski, D.A., Robinson, C. (2012). Know Soil, Know Life. Soil Science Society of America, Madison, WI.

46. Lloyd J. W. and Heathcote J. A, 1985. Chemistry of groundwater, Oxford University Press, New York, 293 pp.

47. Machado, R. M. A., & Serralheiro, R. P. (2017). Soil salinity: effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization. *Horticulturae*, 3(2), 30.
48. Maeda, Y. (2019). Effects of calcium application on the salt tolerance and sodium excretion from salt glands in zoysiagrass (*Zoysia japonica*). *Grassland science*, 65(3), 189-196. doi/pdf/10.1111/grs.12234
49. MacKenzie, W.; Donaldson, C. y C. Guilford., 1982. *Atlas of Igneous Rocks and Their Textures*. Pearson Education Limited, Harlow.
50. Massuyeau, M., Gardés, E., Rogerie, G., (...), Gaillard, F. (2021). MAGLAB: A computing platform connecting geophysical signatures to melting processes in Earth's mantle. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*.
51. Matthaeis, P. (2021). Agenda Items of the World Radiocommunication Conference 2023 with a Potential Impact on Microwave Remote Sensing [Technical Committees] De IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine.
52. Mazor E, 1991. Chemical and isotopic groundwater hydrology the applied approach. 412 pp.
53. Mifflin, M. D., 1988. Region 5, Great Basin, in Back, W., Rosenshein, J. S. and Seaber, P. R. (Eds.), *Hydrogeology*, Geological Society of America, p 69-78.
54. Misra, V., Mall, AK, Ansari, MI (2021). Respuestas fisiológicas y moleculares a la salinidad debido al exceso de Na + en las plantas. En: Husen, A. (eds) *Harsh Environment and Plant Resilience*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65912-7_11.
55. Misra, A.A. (2022) *Atlas of Structural Geological and Geomorphological Interpretation of Remote Sensing Images*, Remote sensing fundamentals.
56. Morán-Ramírez, J., Ramos-Leal, J. A., Santacruz-De León, G., & Fuentes-Rivas, R. M. (2024). Deciphering chemical and physical processes that give rise to natronization in a shallow aquifer in an arid zone. *Groundwater for Sustainable Development*, 26, 101295.
57. Morell, M. K., Blennow, A., Kosar-Hashemi, B., & Samuel, M. S. (1997). Differential expression and properties of starch branching enzyme isoforms in developing wheat endosperm. *Plant Physiology*, 113(1), 201-208.
58. Morris, L., Yun, K., Rutter, A., & Zeeb, B. A. (2019). Characterization of Excreted Salt from the Recretohalophytes *Distichlis spicata* and *Spartina*

- pectinata. *Journal of Environmental Quality*, 48(6), 1775-1780.
doi/full/10.2134/jeq2019.03.0102
59. Morrison, S.M., Liu, C., Eleish, A., (...), Hazen, R.M. (2017). American Mineralogist, Network analysis of mineralogical systems.
 60. Najla, S., Vercambre, G., Pages, L., Grasselly, D., Gautier, H., & Genard, M. (2009). Tomato plant architecture as affected by salinity: descriptive analysis and integration in a 3-D simulation model. *Botany*, 87(10), 893-904.
<https://doi.org/10.1139/B09-061>
 61. Ni, H., Wang, Q., Wang, C., Zhang, Y. (2022). Experimental Petrology: Status Quo and Prospect. *Diqiu Kexue - Zhongguo Dizhi Daxue Xuebao/Earth Science - Journal of China University of Geosciences*.
 62. Niu, Y. (2021). Lithosphere thickness controls the extent of mantle melting, depth of melt extraction and basalt compositions in all tectonic settings on Earth – A review and new perspectives. *Earth-Science Reviews*.
 63. NOM-127-SSA. Norma Oficial Mexicana Salud Ambiental, Uso del Agua y Consumo Humano: Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a Delimitar del Agua para Agua Potable.1994. Disponible en línea:<http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.html>(consulta do el 20 de septiembre de 2018).
 64. Parkhurst, DL y Appelo, CAJ (1999). Guía del usuario de PHREEQC (Versión 2): Un programa de computadora para especiación, reacción por lotes, transporte unidimensional y cálculos geoquímicos inversos. *Informe de investigaciones sobre recursos hídricos*, 99 (4259), 312.
 65. Piper, A. M., & Garrett, A. A. (1953). Native and Contaminated Ground Waters in th e Long Beach-Santa Ana Area, California.
 66. Postma, D. y Appelo, CAJ (2000). Reducción de óxidos de manganeso por hierro ferroso en un sistema de flujo: experimento de columna y modelado de transporte reactivo. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64 (7), 1237-1247.
 67. Pulido-Moncada, M., Flores, B., Rondón, T., Hernández-Hernández, R. M., & Lozano, Z. (2010). Cambios en fracciones dinámicas de la materia orgánica de dos suelos, inceptisol y ultisol, por el uso con cultivo de cítricas. *Bioagro*, 22(3), 201-210.

68. Ramos-Leal, J.A., Juárez-Sánchez, F., Durazo-Lozano, J., González-Moran, T., Ramírez-Guzmán, A.H., Cortes-Silva, A., Johannesson, K.H., 2004, Evidencias de mezcla secuencial binaria en el acuífero de La Muralla, Guanajuato, México, en XXXIII Congreso de la International Association of Hydrogeologists y 7° Congreso de la Asociación Latinoamericana de Hidrogeología Subterránea, 11–15 octubre 2004, Zacatecas, Resúmenes: México, 1–4.
69. Ray, J., Sen, G., Ghosh, B. (2011) Topics in igneous petrology.
70. Reverdatto, V.V., Likhanov, I.I., Polyansky, O.P., (...), Kolobov, V.Y. (2019). Evolution in the understanding of mineral transformations and concept of metamorphic faciesSpringer Geology.
71. Ruiz-Nieto, J. E., Hernández-Ruiz, J., Hernández-Marín, J., Mendoza-Carrillo, J., Abraham-Juárez, M., Isiordia-Lachica, P. M., & Mireles-Arriaga, A. I. (2020). Mesquite (*Prosopis* spp.) tree as a feed resource for animal growth. *Agroforestry Systems*, 94(4), 1139-1149.
72. Rzedowski, J. (1968). 1968. Las principales zonas áridas de México y su vegetación. Bios. Revista del Seminario de Estudios Biológicos 1: 4-24.
73. Rzedowski, J., 2006. *Vegetación de México*. 1ra. ed. digital. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 255 pp.
74. Saucedo, J. U., Rodríguez, H. G., Lozano, R. R., Silva, I. C., Meza, M. G., & Larga, L. (2008). Seasonal trends of chlorophylls a and b and carotenoids in native trees and shrubs of Northeastern Mexico. *Journal of biological sciences*, 8(2), 258-267.
75. Sankoh, A. A., Komba, T., Laar, C., Derkyi, N. S. A., & Frazer-Williams, R. (2022). Application of multivariate and geospatial techniques to assess groundwater quality of two major dumpsites in Sierra Leone. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 18, 100753.
76. Sedov, S., Zazovskaya, E., Fedorov-Davydov, D., & Alekseeva, T. (2019). Suelos del oasis Antártico Oriental: interacción entre organismos y componentes minerales a microescala. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 71(1), 43-63.
77. Singh, A. (2020). Salinization and drainage problems of agricultural land. *Irrigation and Drainage*, 69(4), 844-853.

78. Soca Flores, R. (2015). Identificación de tierras degradadas por salinidad del suelo en los cultivos de caña de azúcar en Pomalca usando imágenes de satélite.
79. Soil Science Society of America. (2022). Soil Chemistry. Available at: <https://www.soils4teachers.org/chemistry>.
80. Songlin Chen, 1988. Trilinear diagram revisited application, limitation, and an electronic spreadsheet program: Ground Water Vol. 26, No. 4: 505-510 pp.
81. Schowengerdt, R.A. (2006). Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing, Remote Sensing.
82. SGEM, (2020). Historical features of the development of technical, methodological, organizational and scientific approaches in the remote study of the earth's Surface Chesnov, V. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management.
83. Sparks, D.L. (2019). Fundamentals of Soil Chemistry. In Encyclopedia of Water, P. Maurice (Ed.). <https://doi.org/10.1002/9781119300762.wsts0025>
84. Steel, R.J., Milliken, K.L. (2013). Major advances in siliciclastic sedimentary geology, 1960-2012. Special Paper of the Geological Society of America.
85. Tex, E.D. (2024). Elements of Structural Geology, Structural Petrology.
86. Tiwari, S., Kushwaha, P.K., Saraswat, A., (...), Singh, Y. 2023 10th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering, UPCON 2023. Remote Sensing: A Comprehensive Overview of Principles and Applications.
87. Thien, SJ (1979). Un diagrama de flujo para enseñar el análisis de textura por tacto. *Revista de educación agronómica*, 8 (1), 54-55.
88. Tóth J (1999) Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeol J* 7:1–14
89. Tristán-González, M, 1987. Cartografía Geológica “Hola Tierra Nueva”, S.L.P. Esc. 1: 50, 000. Folleto Técnico N°. 109. San Luis Potosí, S.L.P. México.
90. Tristán-González, M., Labarthe-Hernández, G., Aguirre-Díaz, G. J., & Aguillón-Robles, A. (2008, October). Tectono-volcanic control of fissure type vents for the 28 Ma Panalillo ignimbrite in the Villa de Reyes Graben, San Luis

Potosí, México. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 3, No. 1, p. 012026). IOP Publishing.

91. Van Lynden, GWJ, Mantel, S. y Van Oostrum, A. (2004). *Principios rectores para la evaluación cuantitativa de la degradación del suelo con especial atención a la salinización, la disminución de nutrientes y la contaminación del suelo* (No. 36/2004). ISRIC y FAO.

92. Varotsos, C.A. (2021). *Remote Sensing Letters*, Editorial Sir John Houghton Cracknell, A.P.

93. Verma, S. K., Torres-Sánchez, D., Hernández-Martínez, K. R., Malviya, V. P., Singh, P. K., Torres-Hernández, J. R., & Rivera-Escoto, B. A. (2021). Geochemistry of Eocene felsic volcanic rocks from the Mesa Virgen-Calerilla, Zacatecas, Mexico: Implications for the magma source and tectonic setting. *Geological Journal*, 56(7), 3771-3790.

94. Viera Silva, D., Dos Anjos, L., Brito-Rocha, E., Dalmolin, A. C., & Mielke, M. S. (2016). Calibration of a multi-species model for chlorophyll estimation in seedlings of Neotropical tree species using hand-held leaf absorbance meters and spectral reflectance. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 9(5), 829. <https://doi.org/10.3832/for1785-009>

95. Wakeel, A. (2013). Potassium–sodium interactions in soil and plants under saline-sodic conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176(3), 344-354. doi/pdf/10.1002/jpln.201200417

96. Wodehouse, R. P., 1935, *Pollen Grains*. 574 pp., Mac Graw-Hill Cc., New York (in Erdtman, 1952).

97. Yu, L., Tang, S., Guo, C., Korpelainen, H., Li, C. (2023). Differences in ecophysiological responses of *Populus euphratica* females and males exposed to salinity and alkali stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 198, 107707. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107707>Get rights and content

98. Zou, Y., Chen, J., Wu, J., (...), Zhai, M. (2022). Diffusion in metamorphic geology: Principles, applications, and problems. *Yanshi Xuebao/Acta Petrologica Sinica*.

Anexo I



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of South American Earth Sciences

journal homepage: www.elsevier.com/locate/james



Evidence in rocks, soil, and water of hydrolysis processes causing sodicity and regressive mortality in arid environments

Erika Loyola-Martínez^a, José A. Ramos-Leal^a, Janete Morán-Ramírez^{b,*},
Ulises Rodríguez-Robles^c, Sanjeet K. Verma^a

^a División de Geociencias Aplicadas, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), Camino a la Presa San José 2055, San Luis Potosí, 78216, Mexico

^b CONACYT, División Geociencias Aplicadas, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), Camino a la Presa San José 2055, San Luis Potosí, 78216, Mexico

^c Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara, Av. Independencia Nacional 151, Centro, 48900, Autlán de Navarro, Mexico

ARTICLE INFO

Keywords:
Hydrolysis
Salinization
Sodic
Groundwater
Tierra Nueva

ABSTRACT

This work aims to identify the origin of water and soil salinization in an arid area. Sodicity is a type of salinity found in arid or desert soils, influencing soil nutrient loss.

Petrography, mineralogy, X-ray diffraction, and hydrogeochemistry techniques were applied to address water and soil salinity in the arid area of Tierra Nueva. A textural analysis classified the soil types derived from the alteration of the dominant rocks in the region. Hierarchical cluster analysis, principal component analysis, and hydrogeochemistry identified the types of water and the main routes of the water evolutionary processes (dissolution, precipitation, and ion exchange).

The results indicate that salinization can be geogenic and anthropogenic, in the first case, the aquifer composed of igneous rocks of andesitic and rhyolitic composition, release sodium during weathering. Anthropogenic activities in the region also increase salinization. Three dominant processes were identified: (i) where water-rock interaction predominates; (ii) mixing with hydrological influences of irrigation return; (iii) which is affected by ion exchange in the clayey soil and the capillary effect with high evaporation, which subsequently intensifies the salinity of the water and soil in the Tierra Nueva region.

The sodicity levels in water and soil suggest that regressive mortality affects resilient species such as mesquites (*Prosopis* spp.) and huisache (*Acacia farnesiana*). Due to osmotic stress, these species form nodules and cracks in their stems, leading to regressive mortality.

1. Introduction

Salinization is one of the essential causes of desertification and soil degradation due to the increase in temperature and decrease in rainfall recorded in recent years (Soca Flores, 2015). The salinization problem is one of the planet's most severe and widespread soil degradation processes (Van Lynden et al., 2004; Machado and Serralheiro, 2017). This phenomenon is associated with arid climatic conditions, original materials rich in sodium (rhyolitic rocks), and poor-quality water in agricultural soils (Singh, 2020). Salinization and sodicity are the main phenomena responsible for soil deterioration (Pulido-Moncada et al.,

2010). Soil salinity is a stress factor that negatively affects plant growth and development (Rahid et al., 2023). It also harms ecosystem services and causes sharp reductions in crop yields and regressive death by sodicity (Roychowdhury et al., 2020; El-Ramady et al., 2022). Therefore, it is crucial to know the origin of the sodicity affecting the cultivation areas.

Sodicity is a significant obstacle to plant development and yield. This phenomenon negatively affects the balance of essential nutrients, deteriorates soil physical properties, and amplifies the problems caused by waterlogging, thus making it difficult to establish optimal growing conditions (Minhas et al., 2020; Maeda, 2019).

* Corresponding author.

E-mail addresses: erika.loyola@ipicyt.edu.mx (E. Loyola-Martínez), jalfredo@ipicyt.edu.mx (J.A. Ramos-Leal), janete.moran@ipicyt.edu.mx (J. Morán-Ramírez), ulises.rodriguez@academicos.udg.mx (U. Rodríguez-Robles), sanjeet.verma@ipicyt.edu.mx (S.K. Verma).

<https://doi.org/10.1016/j.james.2025.105514>

Received 18 February 2025; Received in revised form 3 April 2025; Accepted 3 April 2025

Available online 10 April 2025

0895-9811/© 2025 Elsevier Ltd. All rights are reserved, including those for text and data mining, AI training, and similar technologies.

Water constitutes 80 %–95 % of plant tissues, so a low water supply causes water stress. Salt stress significantly reduces plants' chlorophyll content, which reduces photosynthetic efficiency and biomass production (Morris et al., 2019; Li et al., 2018). Chlorophyll is a crucial pigment in plants, playing a vital role in photosynthesis, which is essential for carbon assimilation. In mesquites (*Prosopis* spp.) and Huizaches (*Acacia farnesiana*), the chlorophyll content indicates the plant's health and ability to carry out photosynthesis efficiently (Li et al., 2018; Mandal and Dutta, 2020; Talebadeh and Valeo, 2022).

The incorporation of geogenic sodium into soils and water is mainly due to the chemical alteration of minerals such as alkali feldspars and plagioclase feldspars (Bowen, 1928). The weathering of these minerals is physical and chemical. When exposed to environmental factors and climatic conditions, the minerals present in volcanic rocks are altered, releasing sodium concentrations into the environment (Hasenmueller et al., 2017). Weathering can be classified into six types (Bowen, 1928; Hasenmueller et al., 2017): type I, fresh rock; type II, slightly altered; type III, moderately altered; type IV highly altered; type V, completely weathered; and type VI, residual soil. Weathering generates clay minerals and iron oxides that subsequently accumulate in fine material (e.g., muscovite, and montmorillonite), which increases when the interaction of plants is more significant (Hasenmueller et al., 2017; Geological Survey of London (GSL), 1995; Goldich, 1938). The weathering of Haloclasty, which is derived from the growth of salt crystals immersed in its pores, and water (moisture, rain, dew, evaporation, etc.), play an important role because they hydrate the rock and therefore it increases in volume. Consequently, the soils are salinized and the environment where they develop is the main factor in arid, semi-arid, or semi-desert areas.

Mafic and ultramafic rocks with high ferromagnesian minerals and calcium content are precarious and alter faster than silica-rich felsic rocks, where alkaline minerals have a more incredible difficulty to be changed (Colman and Kl, 1981). The alterability of minerals is essential for the formation of soils. In such a way, the soil is abundant in rocks with ferromagnesian whereas scarce in felsic rocks.

The study's main objective was to determine the source of sodium salinization in soils and water, which affects vegetation and crops in the Tierra Nueva region. The valley has been used for approximately 30 years as an agricultural area with non-technical irrigation in an arid climate with high evaporation.

Different methodologies are used for this purpose, including petrography, X-ray diffraction, hydrogeochemistry, hierarchical cluster analysis, and principal component analysis.

2. Study area

The study area located in the Tierra Nueva in southeast city of San Luis Potosí (Fig. 1), having an area of 540.61 km², consists of Cretaceous to Quaternary rocks. Its elevation ranges from 1610 m above sea level (masl) to 2100 masl, with hills and medium to gentle slopes, such as Cerro La Silva, and moderately steep plateaus that reach a maximum altitude of 2160 masl (Mesa de Salapuedes). The average annual precipitation is 444.6 mm and the annual potential evaporation is 1740.92 mm (Koppen, 1936; INAPAP. Basic Climatological Statistics of the State of San Luis Potosí, 2005). In the study area, the approximate irrigated surface is 162 ha, and its main activity is the cultivation of Alfalfa (*Medicago sativa*) and maize (*Zea mays*).

2.1. Geology

The study area contains rocks of various ages, ranging from Late Cretaceous to Recent. The Late Cretaceous Caracol Formation (Imlay, 1937; Botero-Santa et al., 2020) is the oldest geological unit and is of marine sedimentary origin. It comprises alternating calcareous shales and thinly bedded dark gray limestones in layers 10–20 cm thick.

The region is located within the Santa María Volcanic Field, which is characterized by its rhyolitic composition (Figs. 2 and 3a) and a mountainous landscape with sparse vegetation: only microphyllous desert scrub, thorny scrub, rose-leaved thorny shrubs, and prickly pear. The volcanic complex, which is characterized by a series of dome chains within the Ojo Caliente Trachyte Volcanic Unit (Labarthe-Hernández et al., 1982). Its formation began with the emission of andesitic lava flows and rhyolitic pyroclastic deposits, which were covered by a lava layer ranging in composition from trachyte to rhyolite. Magmatism belonging to the Santa María Volcanic Complex occurred from 32.5 ± 0.8 to 29.5 ± 0.7 Ma (Tristán-González et al., 2009). The rhyolitic rocks have high silica contents between 68 % and 77 %. This rock is Early Oligocene in age (Labarthe-Hernández et al., 1982), rhyolitic rocks are composed of high silica contents between 68 % and 77 %. The main minerals are quartz (SiO₂), alkali feldspar (K, Na, Ca, Ba, NH₄)(Si, Al)₄O₆, plagioclase feldspar (Na, Ca)(Si, Al)₃O₆, mafic minerals such as biotite, hornblende, and pyroxenes, and accessory minerals such as zircon, apatite, magnetite, and ilmenite (Labarthe and Tristán, 1980). These volcanic rocks are intersected by a series of intrusive rocks of granitic composition from the Late Oligocene (Fig. 3a).

This type of igneous activity led to the presence of dikes and the expulsion of hydrothermal fluids that filled and sealed the fractures in the volcanic rocks, making them impermeable (Padilla-Reyes, 2014).

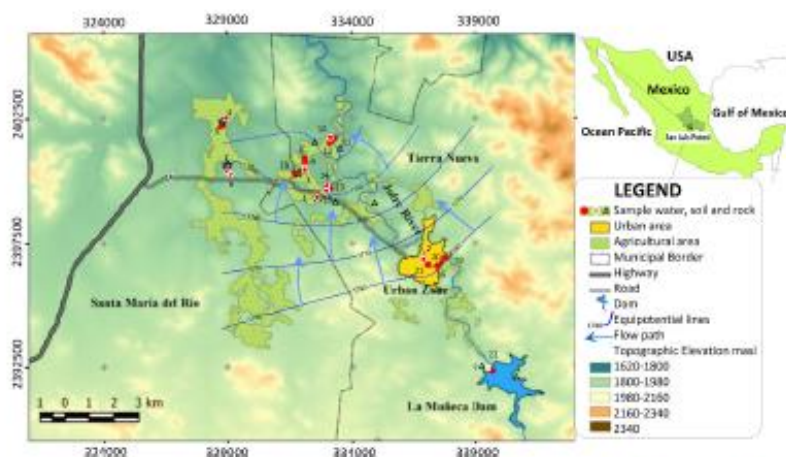


Fig. 1. Location and geomorphology of the study area using a digital elevation model, location of water, soil and rock samples in the Tierra Nueva aquifer.

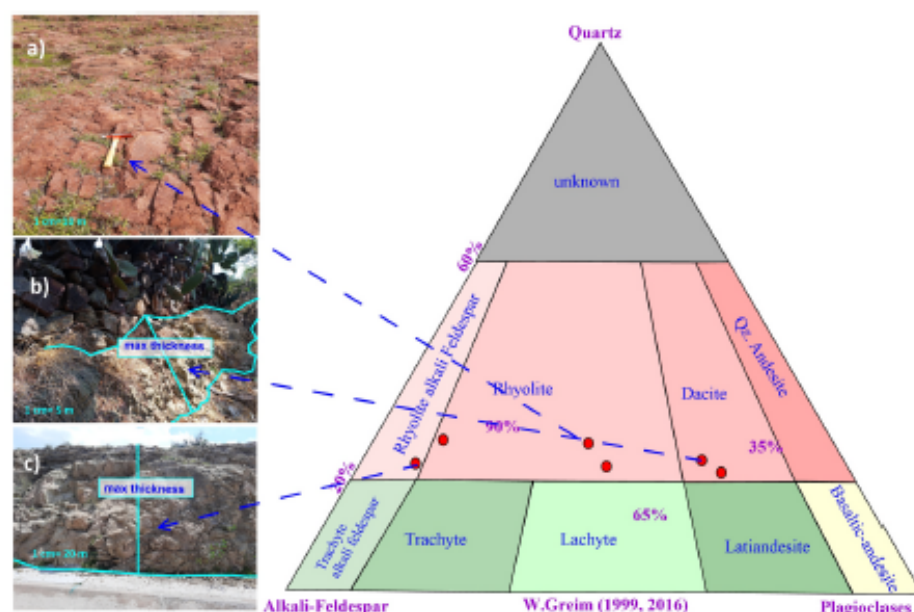


Fig. 2. a) Stratigraphic column, b1) porphyritic rhyolite outcrop, b2) petrographic image of porphyritic rhyolite, c1) alkali feldspar (AF) rhyolite outcrop, c2) petrographic image of alkali feldspar rhyolite, d1) dacitic or rhyodacitic rocks and d2) petrographic image of dacitic or rhyodacitic rocks.

The Quaternary rocks are composed of alluvium deposited on the banks of rivers and streams. These sedimentary deposits comprise silt, sand, and gravel with dacite, rhyolite, and granitic clasts. The geomorphology of the study area is primarily determined by weathering, denudation, and erosion; this is also influenced by the climatic conditions that have prevailed since the Oligocene (30 Ma) to the present (Labarthe et al., 1984).

2.2. Hydrogeology

The hydrogeological characteristics of the geological units are low to slight permeable; this is associated with andesitic and rhyolitic volcanic rocks with a small degree of alteration and highly compacted with a basement of intrusive rocks of granitic composition (Tristán-González et al., 2009). Due to these conditions, dug wells and infiltration galleries are near the Jofre River bed. A narrow filling of conglomerates and unconsolidated silty sands forms the Jofre River valley. The thickness of these sediments can reach 20 m in the central part of the Jofre valley.

The primary source of recharge of the aquifer is the La Muñeca Dam. Downstream of the dam, uplift pressure is affected below the dam, evidenced by small runoffs. The shallow aquifer is affected by the return of irrigation, given the intense irrigation carried out with water from the La Muñeca Dam.

3. Methods and materials

The methodology applied to determine sodicity consists of six samples of petrography and X-ray diffraction, mineralogy, and chemical analysis of water and soil. Twenty-one groundwater samples were collected from wells and one surface water sample from a dam (APHA, 1998). Physicochemical parameters pH, electrical conductivity (EC) and temperature (T), dissolved oxygen (DO), alkalinity, and oxidation reduction potential were measured in situ at each point, using a multi-parameter model HI 98194 (pH/EC/DO Multiparameter). The chemical analysis of the cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , and B^{3+} were carried out by Emission Spectrometry with Inductively Coupled Plasma and Cl^- , SO_4^{2-} ,

PO_4^{3-} , F^- and NO_3^- anions by colorimetry, data with an error of less than 10 % were used.

Six rock samples were collected for petrographic analysis. The mineralogical composition was determined by petrography with a Nikon Eclipse LV100 POL petrographic microscope (polarized light). The mineralogy was analyzed with a scanning electron microscope (SEM) that allows studying the composition and structure of minerals, using a Philips FEO-XL30 microscope and a FEI Tecnai F30 S-TWIN G2 300 kV HRTEM microscope. To examine by counting points (100), determining the presence of principal components and X-ray diffraction (XRD) Smart lab Rigaku (Cu K α X-ray tube; 40 kV 44 mA) was used to quantify the abundance of feldspars, plagioclase, and quartz in the analysis of diffractograms. The analytical procedures, accuracy, and precision were given by Verma et al., 2021 (Verma et al., 2021).

In addition, 11 samples of soil (1 kg) were taken from the agricultural areas at the depth reached by the roots of the Alfalfa plant; each soil sample was determined by the texture touch method based on Wilcox (1955) (Wilcox, 1955), as well as conductivity and pH, with a depth of 0–30 cm and 0–60 cm in silt, clay, and sand.

Hierarchical cluster analysis (HCA) and principal component analysis (PCA) are the one most widely applied in Earth sciences (Davis, 1986) and often used in the classification of hydrogeochemical data. The description of HCA and PCA techniques and the methodology used for their application are detailed in Cloutier et al. (2008) (Cloutier et al., 2008). Statistical treatment of the "raw" (analytical) data presented in this paper, was done using the free statistic software Past 4.03 (Paleontological Statistics): All data were examined using the Shapiro-Wilk's test (Shapiro and Wilk, 1965) for normal distribution choosing $p < 0.05$, which indicated a significant departure from normality.

The diagnosis of regressive mortality began with a sampling of plants from the La Muñeca dam to the discharge area (downstream). Two representative plants of the study area were selected: mesquite (*Prosopis* spp) and huisache (*Acacia farnesiana*). Chlorophyll measurements were taken on these plants in a saline environment, considering specific characteristics such as the death of shoots, branches, or the entire plant, which interfere with their growth. The equipment used was the portable

chlorophyll meter (SPAD-502; Relative chlorophyll content index).

4. Results and discussion

To understand the origin of sodicity in the soil, water, and vegetation of the study area, natural components such as geology, soil type, and hydrogeochemistry were analyzed. In addition, anthropogenic components, i.e., changes that affect both soil and water in the study area, were identified.

4.1. Petrography and mineral

The petrographic analysis of the sample taken in this study contains alkaline-dacitic feldspathic rhyolitic rocks (Fig. 3b, c, 3d, and Fig. 4a, b, 4c). The mineralogical composition of these volcanic rocks is fragments of glassy or vitreous matrix, clasts of feldspar, plagioclase, quartz, and some other minerals such as albite. One of the main elements is sodium, when these minerals are altered (Kaneva, E., Radomskaya, T., Shendrik, R., Chubarov, V., Danilovsky, V., 2021), this element disaggregates in the soil (Fig. 3b2, 3c2, 3d2 and Fig. 4a, b, 4c).

Microscopic analysis shows a microcrystalline matrix with quartz and little presence of plagioclase (Fig. 3b2, 3c2, 3d2). Fig. 4b confirms the sodification and the content of isolated spherulites, an abundance of feldspar to a lesser extent with alkali feldspar and a hypocalic texture of the rock as described by Mackenzie et al. (1984) (Mackenzie et al., 1984).

In petrographic images (Fig. 4a, b, 4c), it is possible to identify the alteration of minerals. Therefore, most of the primary minerals are altered to secondary minerals (Fig. 4a, b, 4c). The altered primary quartz shows a rim reaction of mafic minerals, indicating a bay edge (Fig. 4a, b, 4c). These quartz minerals are probably formed by a hydrothermal pseudomorphic replacement of early quartz and calcite minerals (Betz and Lents, 2010). Fig. 4b and c shows well-defined minerals surrounded

by other alteration minerals. This can be interpreted as a type II weathering degree, which favors the incorporation of available sodium in the soil and water.

Fig. 4b shows a feldspar crystal surrounded by a clayey matrix and is classified as a type III degree of weathering. Fig. 4c defines plagioclase with an incipient alteration surrounded by a clayey matrix and is also classified as weathering grade III to IV.

4.2. Diffractometry (XRD)

In the XRD diffractograms of rhyolitic rocks (Fig. 4a), the abundance percentages of the following components are shown: sodium-albite-silica-albite 52.7 %, quartz-silicate oxide 45.6 %, and potassium-aluminum-silica 1.7 %. The presence of silica oxide is minimal or not perceptible in the reflected percentage. The two primary sources of Na are albite and sanidine, which were identified in the XRD analysis for the rhyolitic rock sample (Fig. 5a).

In the soil diffractogram (Fig. 5b), the minerals of the rhyolitic rocks were identified as anorthite, anorthoclase, and quartz. In addition, crystalline facies of the salts corresponding to the natrite mineral were obtained in all cases.

4.3. Soil

The soil is scarce in rhyolitic rocks, particularly in this region (Fig. 2a, b and 2c). On the slopes, only sandy textures are found, with more clayey soil in the lower areas of the valley (Fig. 6a1, 6b1 and 6c1). In general, in the valley, there are several types of soils, with lithocoll predominating; in some places, there are Xerophiles, Regosols, Luvisols, and, to a lesser extent, Fluvisols (Thien, 1979). In the lower parts of the valley there is the agricultural area, the predominant texture is sandy-clay loam, sandy-clay loam, silty loam and loam (Fig. 6).

Fig. 6 (Figs. a2, a3, b2, b3, c2 and c3) shows micrographs; in the SEM

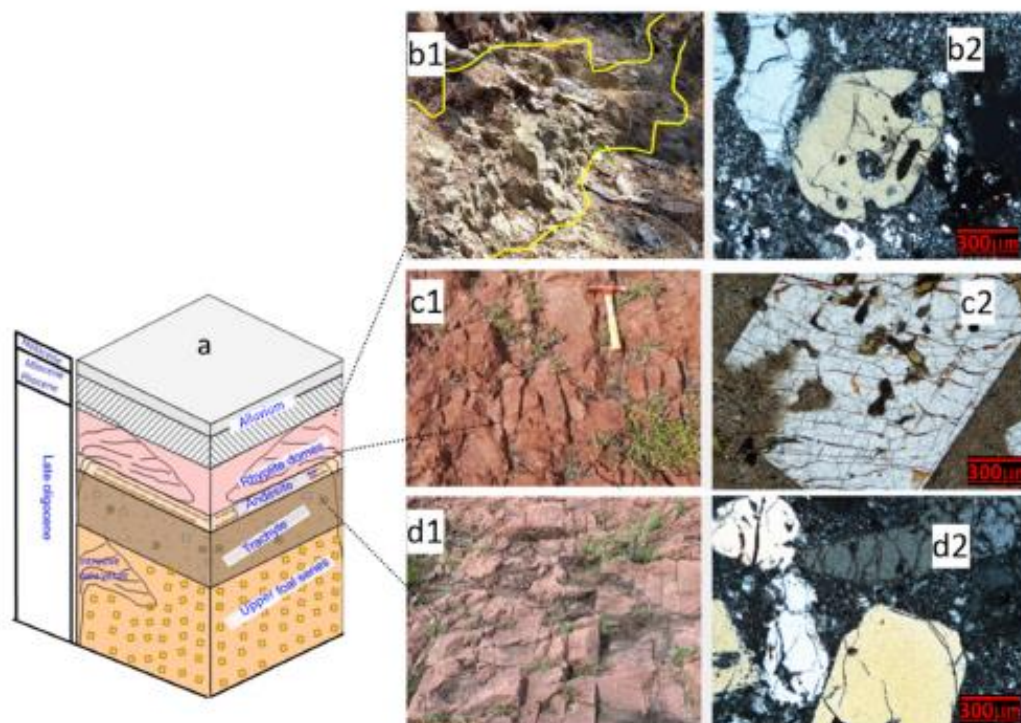


Fig. 3. Microphotographs of rhyolites. The main mineral assemblages are: a) quartz SiO_2 , b) feldspar $(\text{K}, \text{Na}, \text{Ca}, \text{Ba}, \text{NH}_4)(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$, c) plagioclase $(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$.

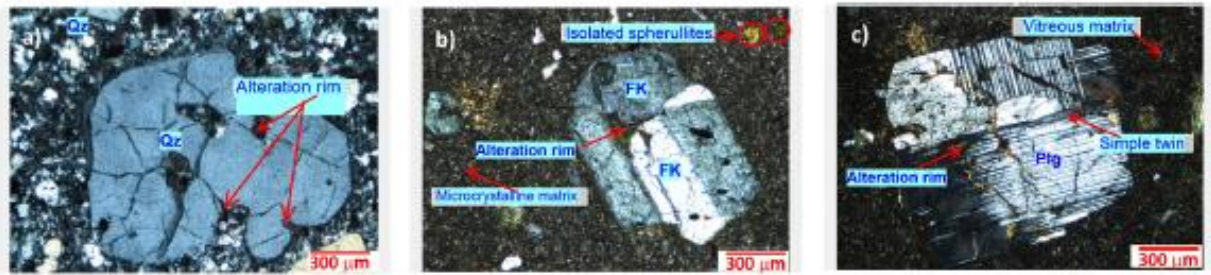


Fig. 4. a) The diffractogram of rhyolitic rocks is notable, identifying abundant albite and sanidine; quartz is second in quantity, and orthoclase are less abundant. b) The soil diffractogram shows minerals from rhyolitic rocks and crystalline facies of salts corresponding to natrite.

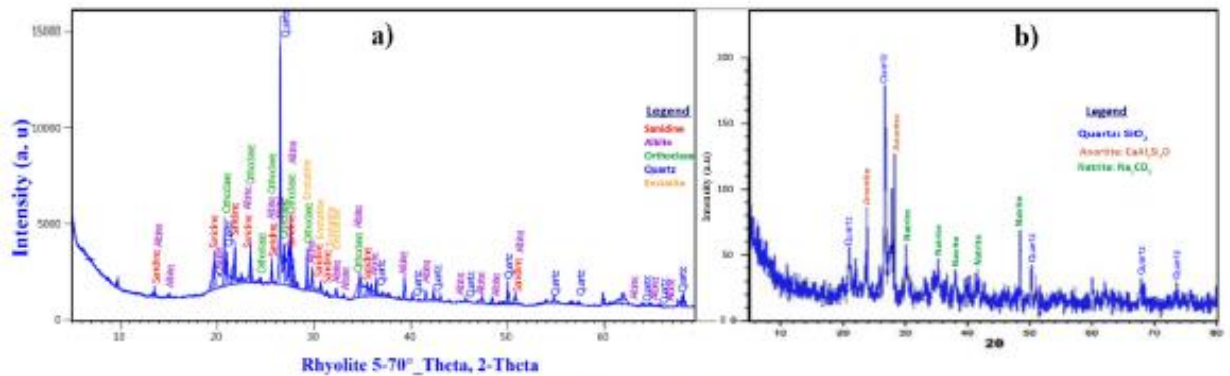


Fig. 5. Exposed volcanic rocks of Tierra Nueva, San Luis Potosí, a) Porphyritic rhyolite, b) Dacite and c) Rhyolite AF, according to the Streckeisen diagram.

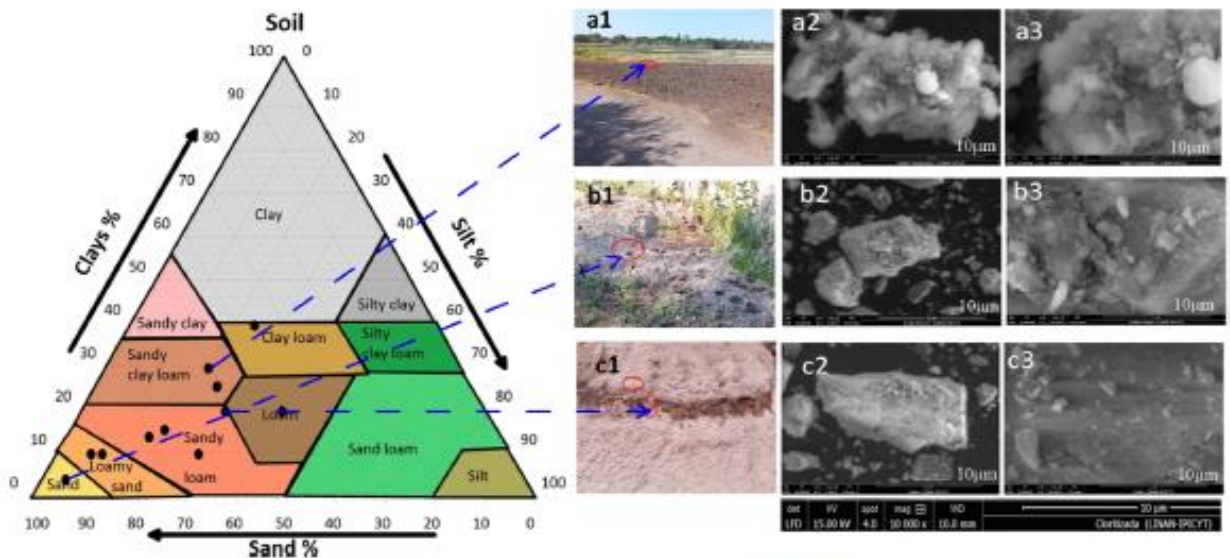


Fig. 6. Shows the ternary diagram of the soil textural classification of the Soil Survey Division Staff (USDA, 1993), six of the twelve textural classes are shown on the left. These soils have different degrees of weathering: a1) sandy clay loam, b1) Sand, and c1) precipitated salt crusts with colors ranging from white to yellowish and brown. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

images the grains that make up the soil are identified, as well as some clusters of thin and elongated crystals that correspond to the salt present in the soil, due to the hydrolysis process in albite and sanidine minerals, which produce sodic soils, which significantly threaten agriculture.

Ramos et al., 2016, measured in the study area at different soil depths, pH 3.75 in the first 15 cm and pH 9 in 30 cm. In addition, they calculated the permeability index with values less than 15 % in both areas. At the same time, they report osmotic pressure index (OP) classifications at 15

cm as permissible saline water and 30 cm as very saline water, with significant problems. According to the RAS index, the water in the study area is classified as moderate to poor quality in terms of sodicity (Ramos-Leal et al., 2016). In this work, electrical conductivity values were measured at 15 cm at 3.59 mhos/cm, while at 30 cm, it is 1.68 mhos/cm. Salts are observed in the soil, which rises by capillarity with high evapotranspiration. These data indicate the presence of sodium stress (Levitt, 1990), which is one of the most limiting environmental factors for plant growth in the study area. The effects include growth retardation, poor germination, leaf burn, wilting, and possible death of the plants.

4.4. Water chemistry

The wells in this study have depths ranging from 5 to 30 m (Fig. 7). The results of the chemical analysis of these samples were represented in the trilinear Piper diagram (Piper and Garrett, 1953). The chart is dominated by Na-HCO₃ water families, with some mixed Na-Ca-HCO₃ type facies (Fig. 7), and some wells have Ca-HCO₃ hydrochemical facies (Fig. 7).

The Ca-HCO₃ hydrochemical facies are related to the interaction of recently infiltrated water. The Na-HCO₃ water types are likely the result of weathering of underlying rocks that are predominantly Na-rich rhyolitic in composition; as well as ionic exchange reactions. Whereas the Na-Ca-HCO₃ types of water may be due to a mixture with Ca-HCO₃ hydrochemical facies water and ion exchange.

4.5. Water-rock interaction (Hydrolysis)

Hydrolysis is the process where the breakdown of minerals from the silicate group (pyroxenes, feldspars, micas, hornblendes) occurs, which are the most vulnerable to chemical alteration (Morán-Ramírez et al., 2024; Rose and Burt, 1979). These reactions can develop in the hydrothermal environment or as exogenous processes (under atmospheric conditions) in the study area; the intense agricultural activity contributes to humid conditions for altering minerals.

The hydrolysis reaction of silicate minerals in an aqueous solution, where H⁺ and OH⁻ ions are selectively consumed, and K⁺, Na⁺, Ca²⁺ ions, and other cations are transferred from minerals to groundwater

(Appelo and Postma, 1993; Parkhurst and Appelo, 1999). Due to the mineralogical content of the study area, the reactions shown in Table 1 may occur.

In the process of altering minerals (albite and sanidine), Na ions are released into the soil and groundwater, leaving their hydrogeochemical signature in the Na-HCO₃-type waters that predominate in the Jofre River aquifer. Na also increases during the ion exchange process with clays.

The factors that directly influence the alteration are humidity and temperature; for example, in conditions of humidity and high temperature, the hydrolysis of clay, such as kaolinite, will form a gibbsite. Whereas in arid climates, the predominant clay will be of the illite-smectite type (Appelo and Postma, 1993; Parkhurst and Appelo, 1999).

Although Na release from rhyolite rocks by natural alteration can occur over a wide range of time scales, from months to thousands to tens of thousands of years (Yokoyama, 2015; Raj, 2023), once this ion is released, its incorporation into water, the ion exchange and evaporation processes that give rise to the salinization of water and soil, are relatively rapid (Bedoui et al., 2006).

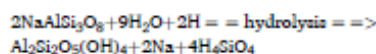


Table 1
Set of hydrogeochemical phases that were considered in water-rock interaction and bibliographic references.

Phase	Reaction	Ref
Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Al}(\text{OH})_4 + 3\text{H}_4\text{SiO}_4$	1
Sanidine	$(\text{K},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8 (\text{Na}_{0.56}\text{K}_{0.44}\text{Ca}_{0.01})_2 = 0.97 (\text{Al}_{0.97}\text{Fe}^{3+}_{0.03})_2$ $= 1.00 \text{ Si}_{3.01}\text{O}_8$	1
Quartz	$\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_4\text{SiO}_4$	1
Kaolinite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 6\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_4\text{SiO}_4 + 2\text{Al}^{3+}$	1
Feldspar	$2\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{H}^+ + 9\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{K}^+ + 4\text{H}_4\text{SiO}_4$	1
Plagioclase	$\text{Na}_{0.62}\text{Ca}_{0.38}\text{Al}_{1.38}\text{Si}_{2.62}\text{O}_8 + 5.52 \text{H}^+ + 2.48\text{H}_2\text{O} \rightarrow$ $0.62\text{Na}^+ + 0.38\text{Ca}^{2+} + 1.38\text{Al}^{3+} + 2.62\text{H}_4\text{SiO}_4$	1
Microcline	$0.013\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8) + 0.013\text{CO}_2 + 0.0195\text{H}_2\text{O} \rightarrow 0.065\text{Al}_2$ $\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 0.013\text{K}^+ + 0.013\text{HCO}_3^- + 0.026\text{SiO}_2$	1

1. (Appelo and Postma, 1993).

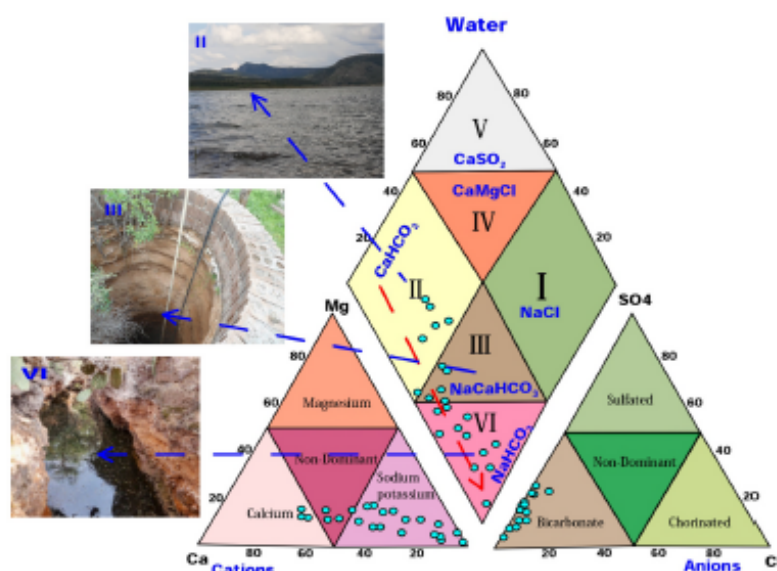
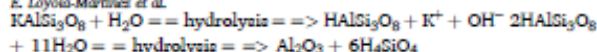


Fig. 7. Piper diagrams are used to identify the main hydrochemical facies of the groundwater samples.



The petrographic and XRD analyses identified minerals such as potassium feldspar, plagioclase, sanidine, albite, orthoclase, anorthite, natrite, and quartz. Their hydrolysis reactions are as follows (Table 1). In the albite hydrolysis reaction, Na^+ is incorporated into groundwater, and clays such as kaolinite, montmorillonite, gibbsite are formed (Aydin and Duzgoren-Aydin, 2002). In the biotite hydrolysis, K^+ and Mg^{2+} are released. While in the hydrolysis of the magnetite, the Fe^{2+} passes to Fe^{3+} by oxidation-reduction reactions when interacting with the groundwater; as evidence of this process in the study area, the red porphyry is presented (pigeon blood) (Aydin and Duzgoren-Aydin, 2002; Postma and Appelo, 2000).

Fig. 8a shows the evolutionary pathways of SiO_2 and HCO_3/Na behavior. Pathway I (red arrow) contains samples 22, 21, 20, 18, 7, and 6; the behavior of SiO_2 concerning HCO_3/Na exhibits an inversely proportional relationship; that is, as silica decreases, the HCO_3/Na ratio increases at a ratio of -0.17 . These samples are associated with groundwater flow from the dam to the groundwater discharge zone, mixing with urban wastewater. Pathway II (black arrow) consists of samples 19, 17, 13, 12, 5, 4, and 3. This group, associated with rock-water interaction processes, is also affected by urban and agricultural anthropogenic activities. It exhibits an inversely proportional behavior with a ratio of -0.8 and is directed in the flow direction. Pathway III (Pink Arrow) is composed of samples 1, 2, 8, 9, 10, 11, 14, 15 and 16. They are associated with rock-water interaction, ion exchange and irrigation return water mixtures with high evaporation.

This group is directly proportional; that is, as the silica increases, the HCO_3/Na ratio rises at a ratio of 1. In this group, the flow converges towards sample 15, located in the discharge zone. The most significant impact on the area occurs in pathway III, where salinity and sodium concentrations are highest in water and soil.

Fig. 8b shows the albite hydrolysis reaction, which is the SiO_2 ratio concerning $\text{Na}/(\text{Ca} + \text{Na})$, the evolutionary pathway I (red arrow), with samples 22, 21, 20, 18, 13, 12, 10, 9, 7, 5, 4, and 3, has a relationship that is directly proportional to a ratio of 2.28; that is, the silica increases much faster than the $\text{Na}/(\text{Ca} + \text{Na})$ ratio. Pathway II (black arrow), 6, and 19 have a relationship directly proportional to a ratio of 1.2; that is, the silica increases much faster than the $\text{Na}/(\text{Ca} + \text{Na})$ ratio. Pathway III (Pink Arrow), with 16, 15, 14, 11, 9, 8, 2, and 1, shows behavior inversely proportional to a percentage of -0.62 ; that is, as silica decreases, the $\text{Na}/(\text{Ca} + \text{Na})$ ratio increases.

In Fig. 8c, the SiO_2 relationship concerning Ca^{2+} is shown; pathway I (red arrow), with samples 22, 21, 20, 18, 7, and 4, has a relationship that is directly proportional to a ratio of 0.4; that is, Ca^{2+} increases much faster than silica. Pathway II (black arrow), samples 3, 5, 6, 12, 13, 17, and 19 have a relationship directly proportional to a ratio of -0.4 ; that is, Ca^{2+} increases much faster than when silica decreases. Pathway III (Pink Arrow) with samples 16, 15, 14, 11, 10, 9, 8, 2, and 1, shows behavior directly proportional to a ratio of 0.12; that is, Ca^{2+} increases much faster than silica.

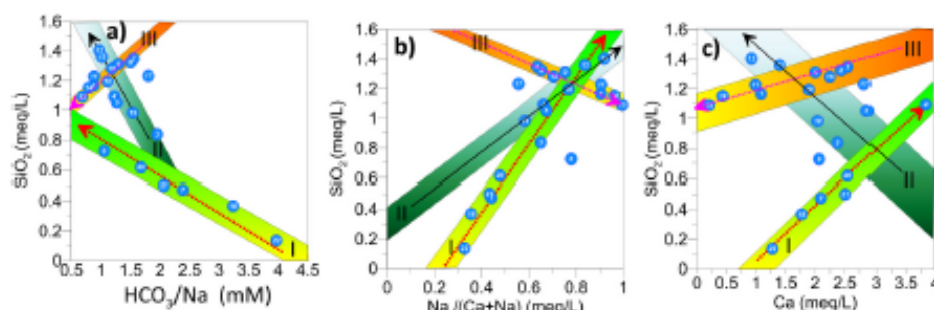


Fig. 8. Scatter diagrams of SiO_2 in relation to cations in groundwater a) $\text{SiO}_2/(\text{HCO}_3/\text{Na})$, b) $\text{SiO}_2/(\text{Na}/(\text{Na} + \text{Ca}))$ and c) SiO_2/Ca .

Fig. 9a shows the relationship between Na versus NO_3 and identifies two distinct evolutionary pathways. The first pathway shows a progressive increase attributed to the evolution of Na and low NO_3 values sin contribución o aporte antropogenico es la muestra 22, 17, 10 y 16. This behavior suggests that the samples of this group come from waters with water-rock interaction, where natural hydrolysis occurs, resulting in the incorporation of Na (Morán-Ramírez et al., 2024; Parkhurst and Appelo, 1999; Aydin and Duzgoren-Aydin, 2002). The second evolutionary route is subdivided according to the origin of NO_3 . In this route, the samples follow a linear pattern that passes through Tierra Nueva. A possible contribution of urban wastewater is observed, which explains the increase in NO_3 levels and low Na concentrations (18, 7, 20, 21). While other samples show an increase in Na and NO_3 content attributed to irrigation returns in the area (13, 12, 11, 14 and 15) and samples influenced by agrochemicals (19, 2, 8, 5, 3, 6, 5, 9, 4 and 1), these two zones correspond to the agricultural area, which is consistent with the area's main economic activity.

Fig. 9b compares soil and water in terms of $\text{Ca} + \text{Mg}$ versus $\text{HCO}_3 + \text{SO}_4$. Initially, the evolutionary trajectory of Ca and Mg cations for water and soil at 60 cm is typical due to clay minerals. This results in an equilibrium of chemical composition between the soil and water samples. At some point in the evolution, water interacts with clays, which leads to ion exchange. The soil samples at 30 cm are located very close to the origin, which is logical due to the poor water-soil interaction. The soil samples at 60 cm behave similarly to groundwater, indicating that both phases are in equilibrium. Note that soil sample 15 at 30 cm behaves similarly to groundwater.

Fig. 9c shows another comparison between soil and water. The recharge zone where we found sample 22, the Muñeca Dam, is located in the black circle; apart from here, the evolutionary path for water begins (blue circles) with an alteration of silicates. This group shows two behaviors that are also observed in the soil samples. In the irrigation zone at 30 cm, the behavior is similar to the evolution of groundwater with little water-rock integration (yellow circles), where sodium is the dominant cation. In soil samples at 60 cm (orange circles), more remarkable mineral alteration is observed than at depths of 30 cm. Some samples at this depth may contain ions derived from irrigation return. In sample 9 at 30 cm, where clay is present, capillarity occurs, and sodium increases with evaporation.

4.6. Analysis of hydrogeochemical data by HCA and PCA

The dendrogram is the main result of the HCA performed on the 22 groundwater samples (Fig. 10). A cluster classification of four primary samples is observed based on a visual observation within the dendrogram, showing a Cophen correlation coefficient value of 0.92, indicating that the clusters are samples with modified evolutionary processes. The resulting dendrogram shows four main groups (C1–C4): C1 (15), C2 (1, 11, 12, and 14), C3 (2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 13, 16, and 17), and C4 (7, 18, 19, 20, 21, and 22). The dendrogram observations reveal very short gaps

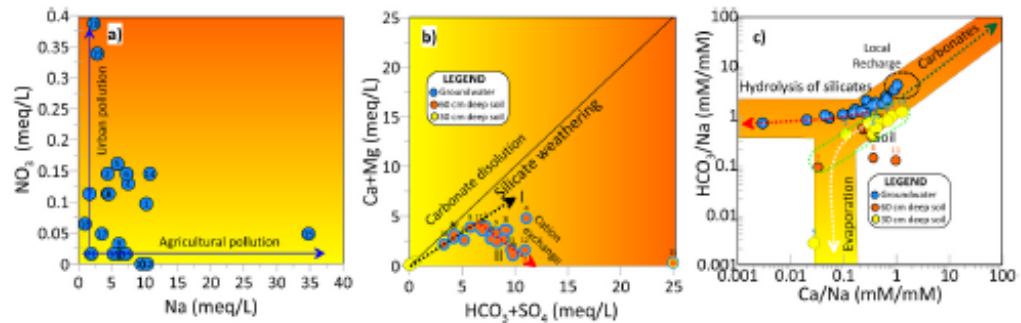


Fig. 9. Identification of the evolution, pollution, evaporation, and mixtures in the Tierra Nueva aquifer through the relationship of a) NO_3^- versus Na, b) Ca + Mg versus HCO_3^- , c) HCO_3^-/Na versus Ca/Na .

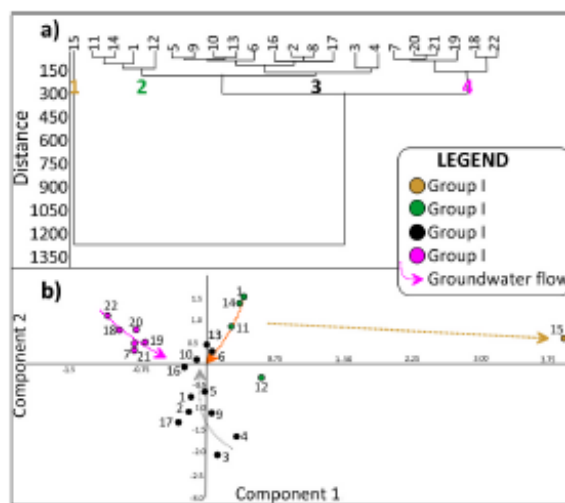


Fig. 10. Multivariate statistical analysis of 22 hydrogeochemical samples. a) Dendrogram for the groundwater samples, showing the division into four clusters and b) plot of principal component scores for the first two components (C1: HCO_3^- and Na^+ ; C2: Na^+ and SO_4^{2-}) for the water samples labeled (Pink: Ca-Mg- HCO_3^- , green: Na- HCO_3^- , black, and yellow: Na-Mg- HCO_3^-) with a coefficient of 0.5 for each cluster. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

between the four main groups attributed to the influence of anthropogenic activity in the study area. C2-C3 appear similar since both are closely linked and belong to the same water classification (Na-Ca- HCO_3^- and Na- HCO_3^-). This evolution is influenced by the return of irrigation caused by the agricultural activity in the area. C1 is the least similar since it has a more significant link distance; these particularities are attributed to the return of continuous irrigation and the type of clayey soil that favors capillarity and the precipitation of sodium salts (Fig. 6c1, 6c2, 6c3 and 9). C4 is a group of waters that presents a natural evolution; however, the presence of nitrates indicates that it is being impacted by urban pollution (Fig. 1, 8 and 10a, and 10b). For PCA analysis, the first component (PC1) was positively correlated with HCO_3^- (0.85) and Na^+ (0.52), accounting for approximately 96.8 % of the total variance in the dataset. This is consistent with the type of rock forming the aquifer, as confirmed by the diffractograms and the hydrogeochemical processes already described. PC2 (2.5 %) is determined by high positive loadings in Na^+ (0.69) and SO_4^{2-} (0.46 %), suggesting a natural evolution in this group. Samples belonging to the same color group suggest the same hydrogeochemical process (evolution) and flow paths (Fig. 10b), so we

deduce that these differences in the plot are due to the degree of anthropogenic impact in the area (Figs. 1, 7 and 10b, Pink: Ca- $\text{Na}-\text{HCO}_3^-$, Green: Na- HCO_3^- , Black: Na-Mg- HCO_3^- , and Yellow: Na- HCO_3^-).

4.7. Regressive mortality in huisaches (*Acacia farnesiana*) and mesquites (*Prosopis* spp.)

The consequences of sodicity stress in groundwater on mesquite (*Prosopis* spp.) and huisache (*Acacia farnesiana*) are identified in the study area, even though these species are known for their resilience in arid environments and their ability to maintain chlorophyll levels under stress in other species as mentioned by different authors (Najla et al., 2009; Djanaguiraman and Prasad, 2012; Vieira Silva et al., 2016; Saucedo et al., 2008).

With the portable chlorophyll meter (SPAD-502; Relative chlorophyll content index) in the species of (*Prosopis* spp.) and huisache (*Acacia farnesiana*) in the study area, it has been revealed that these species are being affected, possibly by the excess of sodium salts in the soil and water of the region, which has caused regressive mortality of the trees, in some places such as described below.

- In the areas near the dam, the average chlorophyll values in huisaches (*Acacia farnesiana*) and mesquites (*Prosopis* spp.) are 18.65 and 24 (SPAD), respectively (Table 2, Fig. 11a and b), where the trees show healthy colors and structures (Saucedo et al., 2008).
- In the intermediate zones of the study area, wilting and changes in stem and foliage color are observed in huisaches (*Acacia farnesiana*) and mesquites (*Prosopis* spp.), with average chlorophyll values of 5.41 and 7.8 SPAD, respectively (Table 2, Fig. 11a and b). In other studies, this process is identified as chlorosis, which represents the lack of chlorophyll, followed by a darkening of the stems, starting from the tips (Jia et al., 2008; Misra et al., 2021; Misra et al., 2021, 2021; Wakeel, 2013).
- In the agricultural area, with the highest salinity levels in water and soil, specimens with regressive mortality and chlorophyll values of

Table 2

Values of physicochemical parameters in groundwater and average values of relative chlorophyll indices in the species mesquite (*Prosopis* spp.) and huisache (*Acacia farnesiana*) in three areas.

	Zone 3	Zone 2	Zone 1
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	3810	350	217
pH	9.24	7.7	8.32
Na (mg/L)	800	22.41	14.26
<i>Prosopis</i> spp.	7.1	12	18.65
<i>Acacia farnesiana</i>	1.5	6.1	24

E.C. Electrical conductivity.

^a SPAD (Relative chlorophyll content index)*.

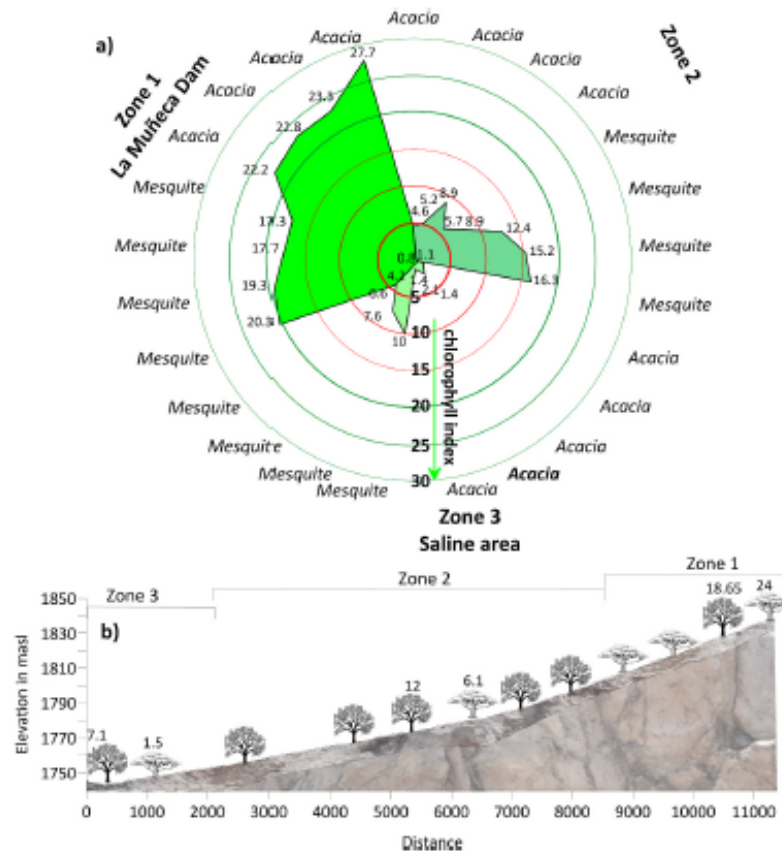


Fig. 11. a) Radial graph of relative chlorophyll content indices in three zones. b) Altitudinal profile with mezquite (*Prosopis* spp) and huizache (*Acacia farnesiana*) species, showing the relative chlorophyll content index.

1.17 SPAD in huizaches (*Acacia farnesiana*) and 7.1 SPAD in mesquites (*Prosopis* spp) are detected. In response to high osmotic pressure, nodules are formed in the species through which water sales are eliminated (Table 2, Fig. 10a and b). In huizache, cracking is observed where the sap escapes, with saline characteristics that produce burns in the trunks, as well as the strangulation of the ends of the huizache, preventing its development and causing its regressive mortality (Fig. 12, supplementary material). Several studies have reported that the parts close to the shoots present cracked nodules generated by physiological and metabolic stress (Don et al., 2010; Hualpa-Ramírez et al., 2024). In grasses, the excretion of salts by the leaves is observed (Morris et al., 2019; Minhas et al., 2020; Yu et al., 2023), a phenomenon that can also be observed in the study area.

As reported in other research around the world (Minhas et al., 2020; Maeda, 2019; Morris et al., 2019), salt stress significantly reduces plant chlorophyll content in the Tierra Nueva study area, decreasing photosynthetic efficiency and biomass production. Chlorophyll is a crucial pigment in plants and is vital in photosynthesis and carbon assimilation. In mesquites (*Prosopis* spp.) and huizaches (*Acacia farnesiana*), chlorophyll content indicates plant health and its ability to photosynthesize efficiently (Li et al., 2018; Mandal and Dutta, 2020; Talebadeh and Valeo, 2022).

5. Conclusions

The volcanic rocks that predominate in the study area are of rhyolitic composition. The minerals that form the rhyolitic rocks are predominantly alkaline feldspars. Petrographic analysis shows that the minerals exhibit weathering grades III and IV. The chemical alteration of the alkaline feldspars during hydrolysis releases Na ions, which are incorporated into the groundwater, giving rise to the geogenic origin of the groundwater's salinity.

At the beginning of the evolutionary process, the Ca-HCO₃ hydrochemical facies are found in a smaller proportion; They are related to the interaction of the rock with recently infiltrated water. As the water evolves, some mixed facies of the Na-Ca-HCO₃ type are generated, which relate the mixture with waters of Ca-HCO₃ hydrochemical facies with ion exchange. In the groundwater discharge zone, Na-HCO₃ water families predominate, resulting from the weathering of underlying rocks predominantly of Na-rich rhyolitic composition.

Hydrochemical analyses indicate three predominant evolutionary pathways (I, II, and III), where silica and the HCO₃/Na ratio decrease, while Ca naturally increases. In Pathway III, the return of irrigation, resulting from intense agricultural activity in the arid zone with high temperatures and clayey horizons, facilitates capillarity in the surface soil layer and its elevated evaporation, resulting in salt precipitation. Salt accumulates when mineralized groundwater is found near the soil surface, continuously evaporating, causing mineral precipitation in the unsaturated zone, contaminating the water and salinizing the soil. The most significant impact is in Pathway III.

These results suggest that regressive mortality affects resilient species such as mesquite (*Prosopis* spp) and Huisaches (*Acacia farnesiana*); increasing groundwater sodicity affects their health, particularly in areas with higher salinity. Due to high sodicity levels, nodules and cracks in trees are caused in response to osmotic stress, leading to regressive mortality in this species.

Monitoring and managing groundwater quality to mitigate these effects and protect local ecosystems is crucial.

CRedit authorship contribution statement

Erika Loyola-Martínez: Writing – original draft, Validation, Software, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. José A. Ramos-Leal: Writing – review & editing, Writing – original draft, Software, Methodology, Investigation, Conceptualization. Janete Morán-Ramírez: Writing – original draft, Investigation, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. Ulises Rodríguez-Robles: Validation, Supervision, Conceptualization. Sanjeet K. Verma: Writing – review & editing, Supervision.

Declaration of competing interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments

EML is thankful CONACYT, Mexico for her Doctoral's fellowship (grant # 519116), whose doctoral thesis is undergoing the supervision of Janete Morán-Ramírez and José Alfredo Ramos-Leal; for the advisory services in the LINAN-IPICYT laboratory by Dr. Ignacio Becerril Juárez. The authors thank COPOCYT and IPICYT for the financial support for this project "Project 3327 Socio-environmental impact of aquifer exploitation" a piezometric analysis."

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105514>.

Data availability

Data will be made available on request.

References

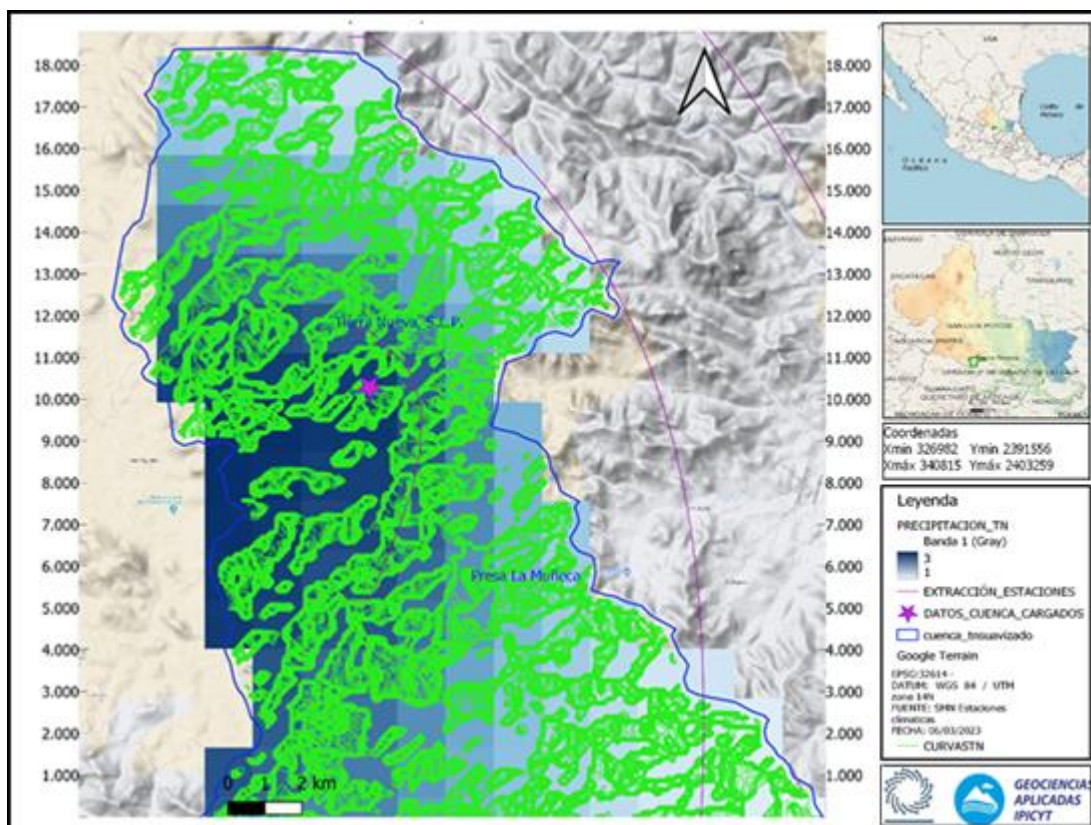
- APHA, 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, twentieth ed. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), and Water Environmental Federation (WEF), Washington, DC.
- Appelo, C.A.J., Postma, D., 1993. Geochemistry, Groundwater and Pollution. CRC press. Geochemistry, groundwater and pollution.
- Aydin, A., Duzgoren-Aydin, N.S., 2002. Indices for scaling and predicting weathering-induced changes in rock properties. *Environ. Eng. Geosci.* 8 (2), 121–135. <https://doi.org/10.2113/enggeosci.8.2.121>.
- Bedoui, K., Bekri-Abbes, I., Srassra, E., 2008. Removal of cadmium (II) from aqueous solution using pure smectite and Lewatite S 100: the effect of time and metal concentration. *Desalination* 223 (1–3), 269–273.
- Beni, T.B., Lentz, D.R., 2010. The nature of "quartz eyes" hosted by dykes associated with Au-Bi-As-Cu, Mo-Cu, and Base-Metal-Au-Ag mineral occurrences in the Mountain Freegold region (Dawson Range), Yukon, Canada. *J. Geosci.* 55 (4), 347–368. <https://doi.org/10.3190/jgeosci.082>.
- Botero-Santa, P.A., Xu, S., Nieto-Samaniego, Á.F., Alaniz-Alvarez, S.A., 2020. Efecto de las fracturas de enfriamiento en la formación de fallas normales: El ejemplo de Santa María del Río, San Luis Potosí, México. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 72 (1).
- Bowen, N.L., 1928. The Evolution of the Igneous Rocks. Princeton Univ. Press, Princeton, NJ, p. 332 (Reprinted 1956. New York: Dover).
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., Savard, M.M., 2008. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *J. Hydrol.* 353, 294–313. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.015>.
- Colman, S.M., Kl, F., 1981. Weathering Rinds on Andesitic and Basaltic Stones as a Quaternary Age Indicator, Western United States.
- Davis, J.C., 1986. Statistics and Data Analysis in Geology. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Djanaguiraman, M., Prasad, P.V., 2012. Effects of salinity on ion transport, water relations and oxidative damage. In: *Ecophysiology and Responses of Plants under Salt Stress*. Springer New York, New York, NY, pp. 89–114. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4747-4_3.
- Don, K.K.G., Xia, Y.P., Zhu, Z., Le, C., Wijeratne, A.W., 2010. Some deleterious effects of long-term salt stress on growth, nutrition, and physiology of gerbera (*Gerbera jamesonii* L.) and potential indicators of its salt tolerance. *J. Plant Nutr.* 33 (13), 2010–2027. <https://doi.org/10.1080/01904167.2010.512058>.
- El-Ramady, H., Faizy, S., Amer, M.M., Elsakhaw, T.A., Omara, A., Eid, Y., Brevik, E., 2022. Management of salt-affected soils: a photographic review. *Environ. Biodiversity Soil Secur.* 6, 61–79. <https://doi.org/10.21608/enbvs.2022.131286.1172>.
- Geological Survey of London (GSL), 1995. The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. Geological Society Engineering Group Working Party Report. Q. J. Eng. Geol. 28, 207–242.
- Goldich, S.S., 1938. A study of rock weathering. *J. Geol.* 46 (1), 17–58.
- Hasenmüller, E.A., Gu, X., Weitzman, J.N., Adams, T.S., Stinchcomb, G.E., Eisenstat, D. M., Kaye, J.P., 2017. Weathering of rock to regolith: the activity of deep roots in bedrock fractures. *Geoderma* 300, 11–31. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.03.020>.
- Hualpa-Ramírez, E., Carrasco-Lozano, E.C., Madrid-Espinoza, J., Tejos, R., Ruiz-Lara, S., Stange, C., Norambuena, L., 2024. Stress salinity in plants: new strategies to cope with in the foreseeable scenario. *Plant Physiol. Biochem.* 108507 <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108507> Getrightandcontent.
- Inlay, R.W., 1937. Geology of the middle part of the Sierra de Parí, Coahuila, Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.* 48, 567–630.
- INAFAP. Basic Climatological Statistics of the State of San Luis Potosí, 2005. 1961–2001. Northeast Regional Research Centre Experimental Field of San Luis. Technical Book No. 258BN: 968-800-659-9.
- Jia, Y.X., Sun, L., He, F., Wan, L.Q., Yuan, Q.H., Li, X.L., 2008. Analysis of effects of salt stress on absorption and accumulation of mineral elements in *elymus* spp. using atomic absorption spectrophotometer. *Guang pu xue yu Guang pu fen xi* Guang pu 28 (12), 2984–2988.
- Koppen, W.P., 1936. Das Geographische System der Klimate. In: *Handbuch der Klimatologie*. Band I Teil C, Berlin, pp. 1–44.
- Labarte, G., Tristán, M., 1980. Geological Cartography Sheet Santa María del Río, S.L. P.: Inst. de Geol. y Metal. Autonomous University of San Luis Potosí, p. 32. Technical Brochure No. 67.
- Labarte, G., Tristán, M., Aguillón, A., 1984. Geological Cartography, Esc. 1:50, 000, Hoja Saltillo, S.L.P., Inst. de Geol. y Metal. Autonomous University of San Luis Potosí, p. 85. Technical Brochure No. 94.
- Labarte-Hernández, G., Tristán-González, M., Aranda-Gómez, J.L., 1982. Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del Estado de San Luis Potosí. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico 85, 208.
- Levitt, J., 1980. Responses of plants to environmental stresses. Chilling, freezing, and high temperature stress 1, 345–447.
- Li, Y., He, N., Hou, J., Xu, L., Liu, C., Zhang, J., et al., 2018. Factors influencing leaf chlorophyll content in natural forests at the biome scale. *Frontiers in Ecology and Evolution* 6, 64. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00064>.
- Machado, R.M.A., Serralheiro, R.P., 2017. Soil salinity: effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization. *Horticulturae* 3 (2), 30. <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020030>.
- Mackenzie, A.S., Brooks, J., Welte, D.H., 1984. Applications of biological markers in petroleum geochemistry. *Adv. Petrol. Geochem.* 1, 115–214.
- Maeda, Y., 2019. Effects of calcium application on the salt tolerance and sodium excretion from salt glands in zoysiagrass (*Zoysia japonica*). *Grassl. Sci.* 65 (3), 189–196. <https://doi.org/10.1111/gs.12234>.
- Mandal, R., Dutta, G., 2020. From photosynthesis to biosensing: chlorophyll proves to be a versatile molecule. *Sensors International* 1, 100058. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2020.100058>.
- Minhas, P.S., Ramos, T.B., Ben-Gal, A., Pereira, L.S., 2020. Coping with salinity in irrigated agriculture: crop evapotranspiration and water management issues. *Agric. Water Manag.* 227, 105832.
- Misra, V., Mall, A.K., Ansari, M.I., 2021. Respuestas fisiológicas y moleculares a la salinidad debido al exceso de Na⁺ en las plantas. En: In: Hassen, A. (Ed.), *Harsh Environment and Plant Resilience*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65912-7_11.
- Morán-Ramírez, J., Ramos-Leal, J.A., Santacruz-De León, G., Fuentes-Rivas, R.M., 2024. Deciphering chemical and physical processes that give rise to natronization in a shallow aquifer in an arid zone. *Groundwater for Sustainable Development* 26, 101295. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101295>.
- Morita, I., Yun, K., Ruttner, A., Zeeb, B.A., 2019. Characterization of excreted salt from the recalcitrant halophytes *Distichlis spicata* and *Spartina pectinata*. *J. Environ. Qual.* 48 (6), 1775–1780. <https://doi.org/10.2134/jeq2019.03.0102>.
- Najla, S., Vercambre, G., Pages, L., Grasselly, D., Gautier, H., Genard, M., 2009. Tomato plant architecture as affected by salinity: descriptive analysis and integration in a 3-D simulation model. *Botany* 87 (10), 893–904. <https://doi.org/10.1139/B09-061>.
- Padilla-Reyes, D., 2014. Hydrogeochemical Processes that Give Rise to Salinity in the Tierra Nueva Aquifer System, San Luis Potosí. Center for Scientific Research and Higher Education. Postgraduate program in Sciences in Earth Sciences with orientation in Environmental Geosciences, Ensenada, Baja California, México, p. 135. Master's Thesis. <https://ciencia.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/927/1/235211.pdf>.

- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., 1999. PHREEQC User's Guide (Version 2): a computer program for speciation, batch reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Research Report on Water Resources 99 (4259), 312.
- Piper, A.M., Garrett, A.A., 1953. Native and Contaminated Ground Waters in the Long Beach-Santa Ana Area, California.
- Postma, D., Appelo, C.A.J., 2000. Reduction of manganese oxides by ferrous iron in a flow system: column experiment and reactive transport modelling. *Geochim. Cosmochim. Acta* 64 (7), 1237–1247. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00356-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00356-7) Getrightsandcontent.
- Pulido-Moncada, M., Flores, B., Rondón, T., Hernández-Hernández, R.M., Lozano, Z., 2010. Changes in dynamic fractions of organic matter in two soils, Inceptisol and ultisol, due to use with citrus cultivation. *Bioagro* 22 (3), 201–210.
- Raj, J.K., 2023. Rock-soil transition during weathering of rhyolite. *Bull. Geol. Soc. Malays.* 76, 55–62. <https://doi.org/10.7186/bgsm76202305>, 2023.
- Ramos-Leal, J.A., López-Álvarez, B., Santacruz-De León, G., Almanza-Tovar, O., Morán-Ramírez, J., Padilla-Reyes, D.A., González-Acevedo, Z.I., 2016. Quality indices of groundwater for agricultural use in the region of Tierra Nueva, San Luis Potosí, Mexico. *Arabian J. Geosci.* 9, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2758-2>.
- Rashid, M.B., Sheik, M.R., Haque, A.E., Siddique, M.A.B., Habib, M.A., Patwary, M.A.A., 2023. Salinity-induced change in green vegetation and land use patterns using remote sensing, NDVI, and GIS techniques: a case study on the southwestern coast of Bangladesh. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 7, 100314. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2023.100314>.
- Rose, A.W., Burt, D.M., 1979. Hydrothermal alteration. 173–235. In: *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* (H.L. Barnes).
- Roychowdhury, R., Choudhury, S., Hasanuzzaman, M., Srivastava, S. (Eds.), 2020. *Sustainable Agriculture in the Era of Climate Change*.
- Sauceda, J.U., Rodríguez, H.G., Lozano, R.R., Silva, L.C., Meza, M.G., Larga, L., 2008. Seasonal trends of chlorophylls a and b and carotenoids in native trees and shrubs of Northeastern Mexico. *J. Biol. Sci.* 8 (2), 258–267.
- Shapiro, S.S., Wilk, M.B., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52, 591–611. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>.
- Singh, A., 2020. Salinization and drainage problems of agricultural land. *Irrig. Drain.* 69 (4), 844–853. <https://doi.org/10.1002/ird.2477>.
- Soca Flores, R., 2015. Identification of Lands Degraded by Soil Salinity in Sugarcane Crops in Pomalca Using Satellite Images.
- Talebadeh, F., Valeo, C., 2022. Evaluating the effects of environmental stress on leaf chlorophyll content as an index for tree health. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1006. IOP Publishing, 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1006/1/012007>, 1.
- Thien, S.J., 1979. A flowchart for teaching texture analysis by touch. *Agric. Educ. Mag.* 8 (1), 54–55.
- Tristán-González, M., Aguilón-Robles, A., Barboza-Gudiño, J.R., Torres-Hernández, J.R., Bellón, H., López-Doncel, R., Labarte-Hernández, G., 2009. Geochronology and distribution of the eruptive centers in the San Luis Potosí volcanic field. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 61 (3), 287–303.
- United States. Division of Soil Survey, 1993. *Soil Survey Manual* (No. 18). US Department of Agriculture.
- Van Lynden, G.W.J., Mantel, S., Van Oostrum, A., 2004. Guiding Principles for the Quantitative Assessment of Soil Degradation with Special Attention to Salinization, Nutrient Depletion and Soil Contamination (No. 36/2004). ISRIC and FAO.
- Verma, S.K., Torres-Sánchez, D., Hernández-Martínez, K.R., Malviya, V.P., Singh, P.K., Torres-Hernández, J.R., Rivera-Escoto, B.A., 2021. Geochemistry of Eocene felsic volcanic rocks from the Mesa Virgen-Calerilla, Zacatecas, Mexico: implications for the magma source and tectonic setting. *Geol. J.* 56 (7), 3771–3790.
- Viera Silva, D., Dos Anjos, L., Brito-Rocha, E., Dalmolin, A.C., Mielke, M.S., 2016. Calibration of a multi-species model for chlorophyll estimation in seedlings of Neotropical tree species using hand-held leaf absorbance meters and spectral reflectance. *IFor. Biogeosci. For.* 9 (5), 829. <https://doi.org/10.3832/for1785-009>.
- Waked, A., 2013. Potassium-sodium interactions in soil and plant under saline-sodic conditions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 176 (3), 344–354. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200417>.
- Wilcox, L., 1955. *Classification and Use of Irrigation Waters*, No. 969. US Department of Agriculture.
- Yokoyama, T., 2015. Kinetics of chemical weathering: field research, laboratory experiment and theoretical analysis of rhyolite weathering. *Jpn. Mag. Mineral. Petrol. Sci.* 44 (1), 45–51. <https://doi.org/10.2465/gkk.141214>.
- Yu, L., Tang, S., Guo, C., Korpelainen, H., Li, C., 2023. Differences in ecophysiological responses of *Populus euphratica* females and males exposed to salinity and alkali stress. *Plant Physiol. Biochem.* 198, 107707. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107707> Getrightsandcontent.

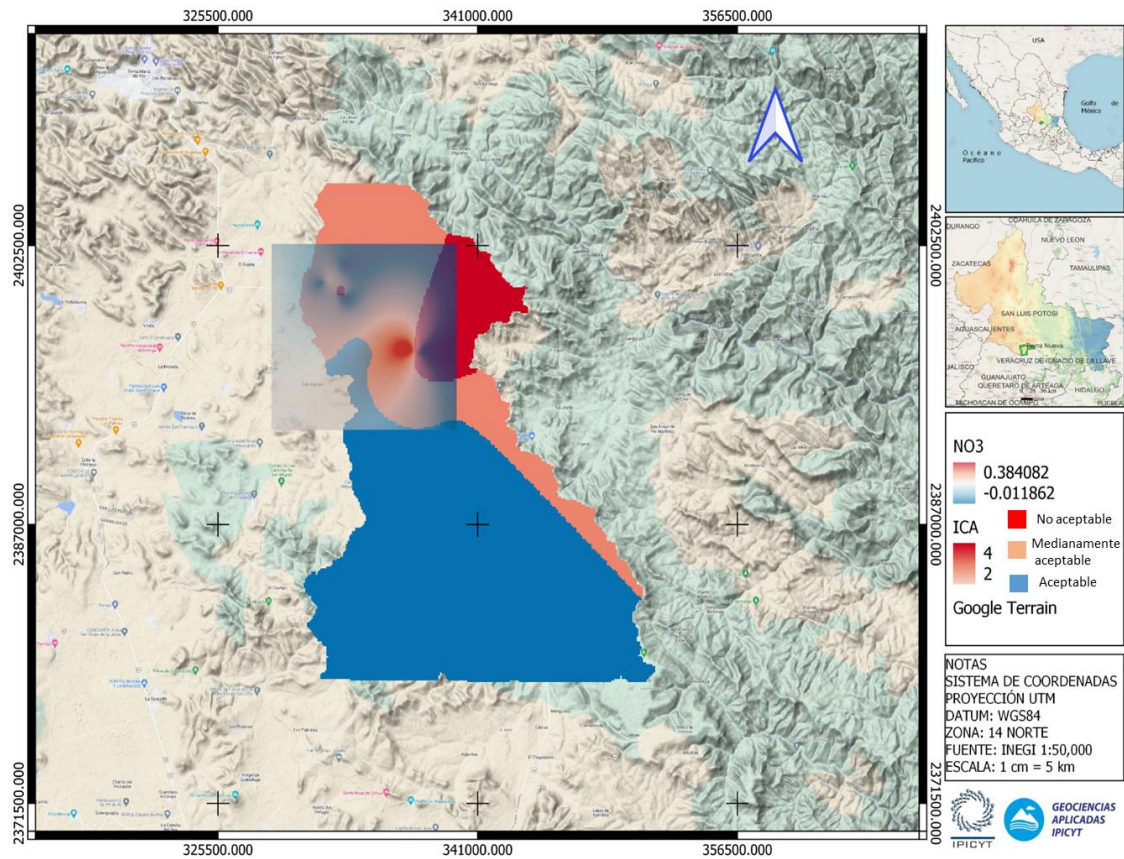
Anexos II

Trabajo de SIG

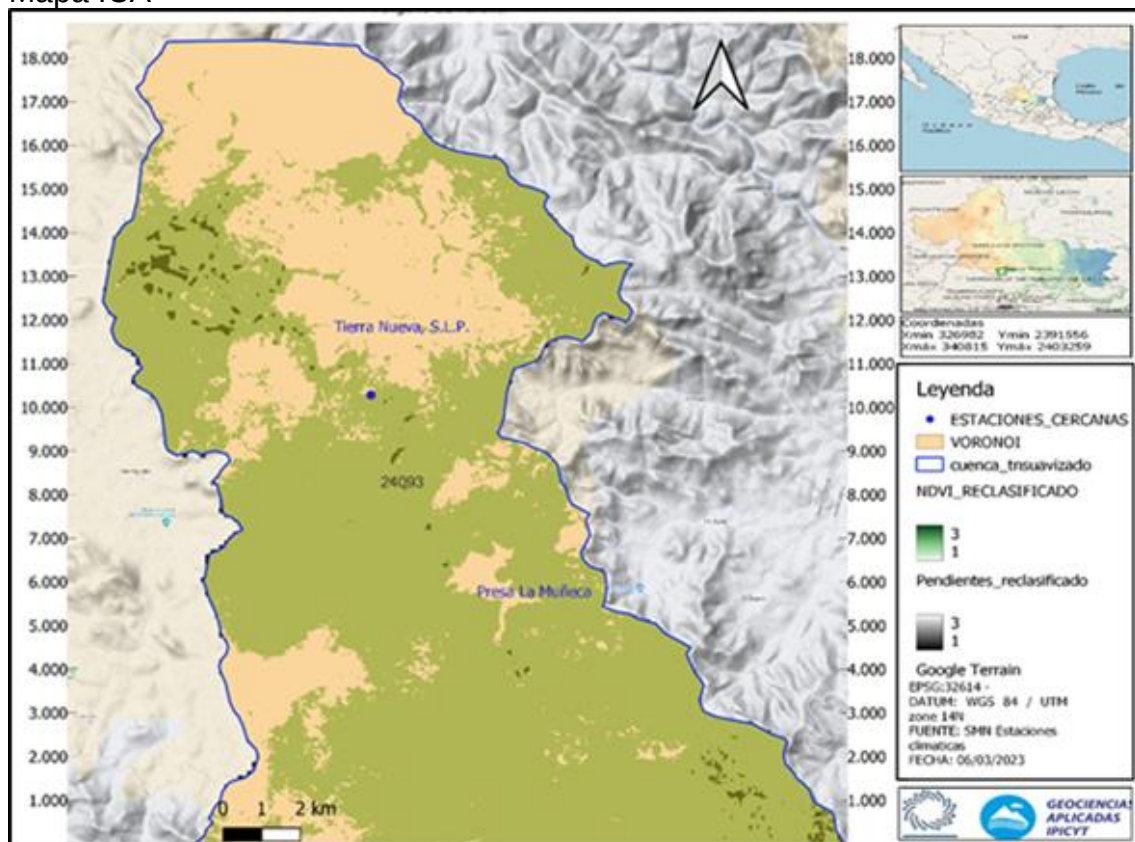
Análisis de datos de manera espacial y temporal de dos décadas desde el 1995 al 2015, y algunos de datos más recientes como del 2021 elaborados en el Ipicyt.



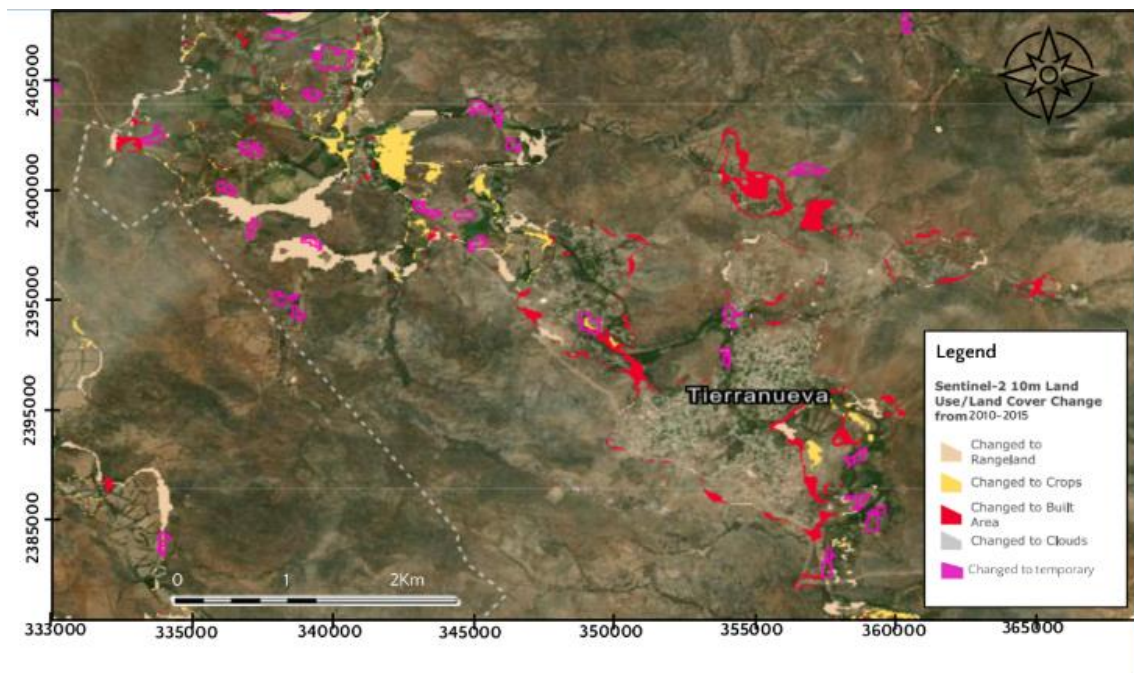
Mapa de precipitaciones mensuales del periodo 1995 al 2015.



Mapa ICA



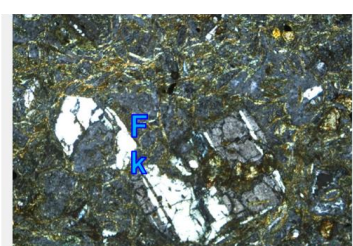
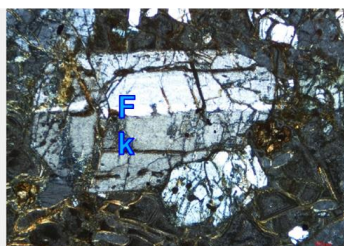
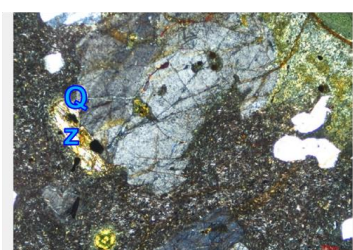
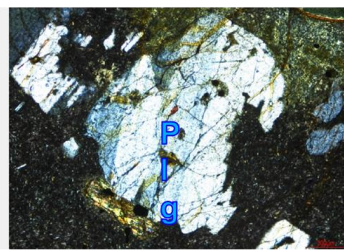
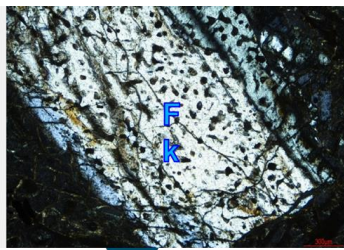
Mapa de Voronoi clasificando con pendientes generando un análisis de vegetación con Figura 10 NDVI.

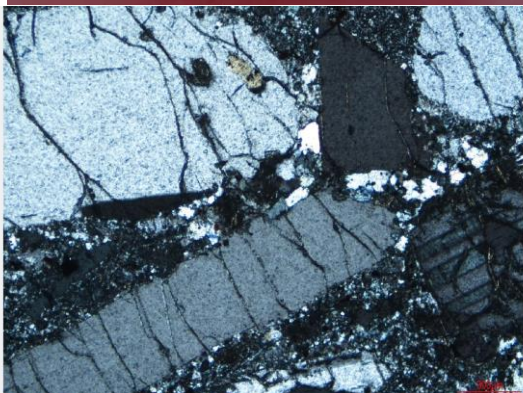
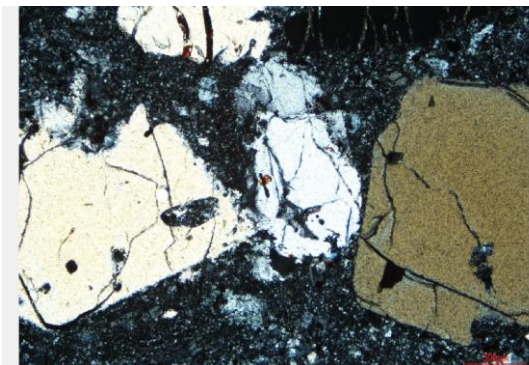
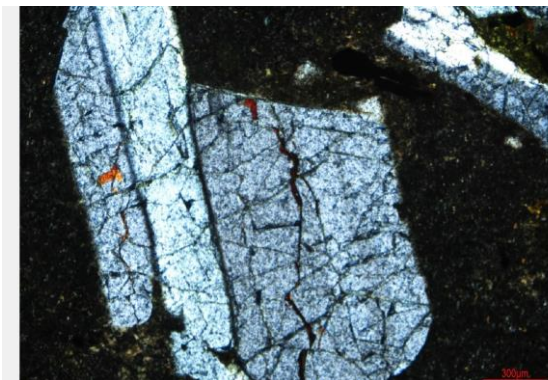
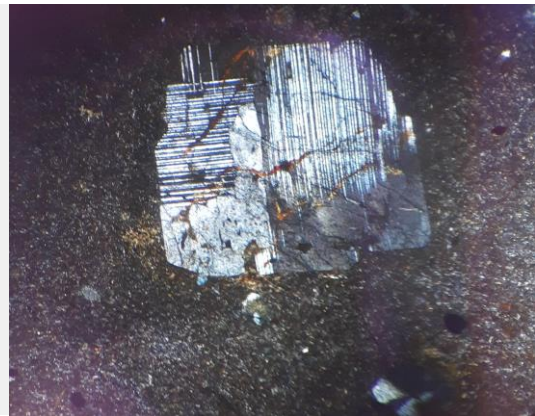
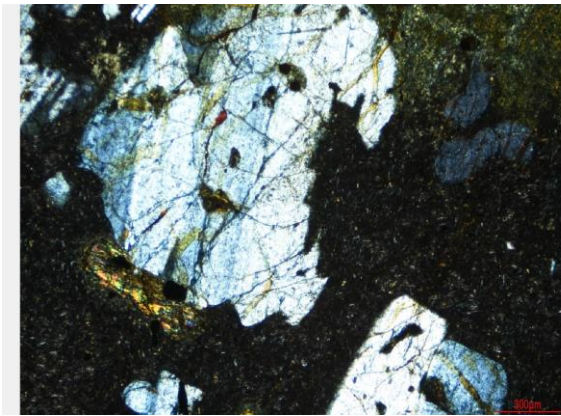


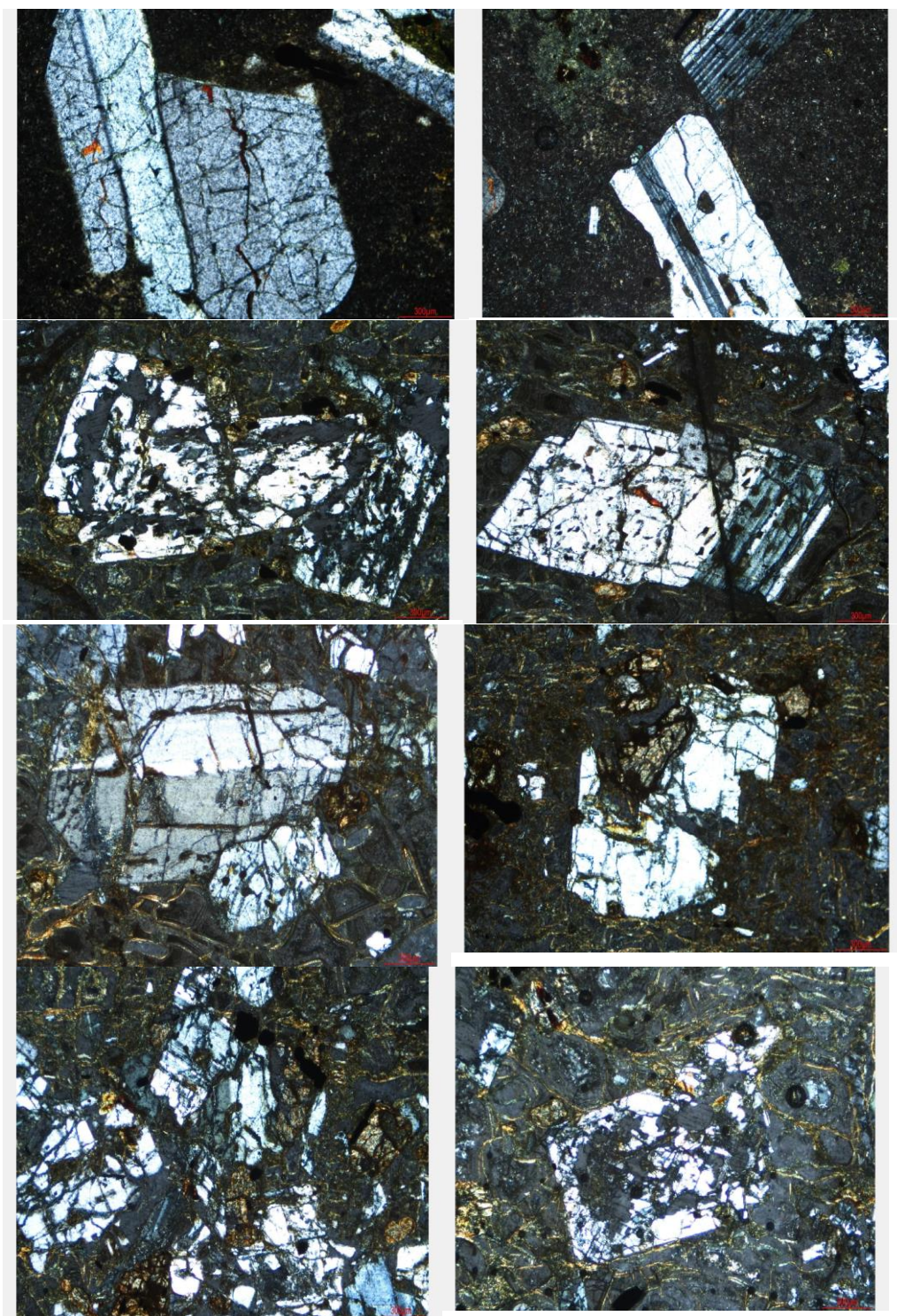
Cambio de uso de suelo 2021.

Microfotografías petrográficas UASLP Instituto de Geología

Testigos de toma de microfotografías petrográficas más proceso de láminas delgadas descrito en metodología y elaboradas en el Instituto de Geología de la UASLP.





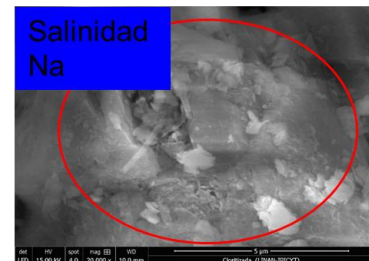
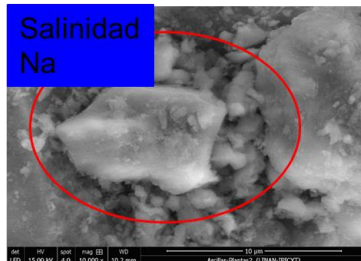
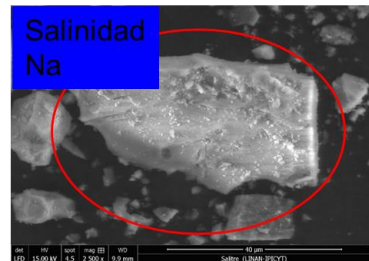
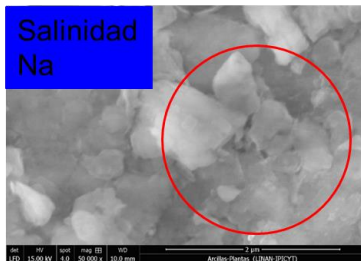




Difracción de Rayos X y SEM

Proceso de preparación para análisis de difracción de Rayos X desde el laboratorio del Instituto de Geología en los diferentes pasos a seguir, para procesar en el Laboratorio de LINAN Ipicyt.





Textura de suelos

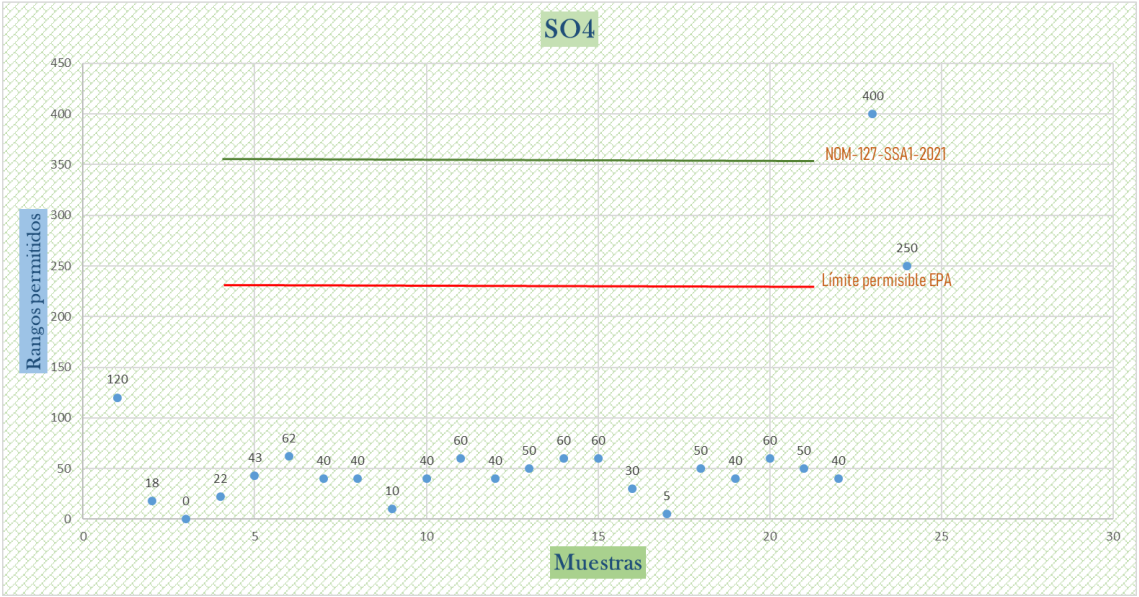
Diferentes tipos de suelos donde fueron muestreados para análisis isotópico, textural de suelos e identificación de Na visible por su tonalidad blanca a rosa abarcando desde la Presa La Muñeca a Hacienda Vieja.



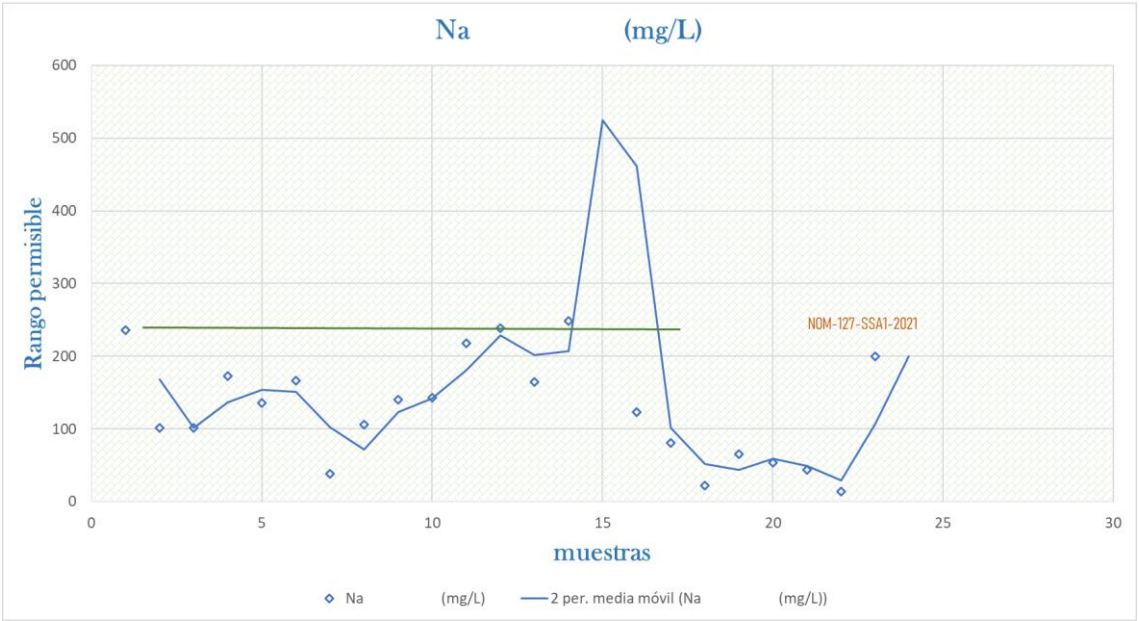
Hidroggeoquímica

Se realizaron análisis de diferentes parámetros representados en las siguientes gráficas permitiendo entender más el proceso de evolución o interacción agua-roca de SO_4 , Na, Dureza, Na_3 dentro de la NOM-127 y EPA.

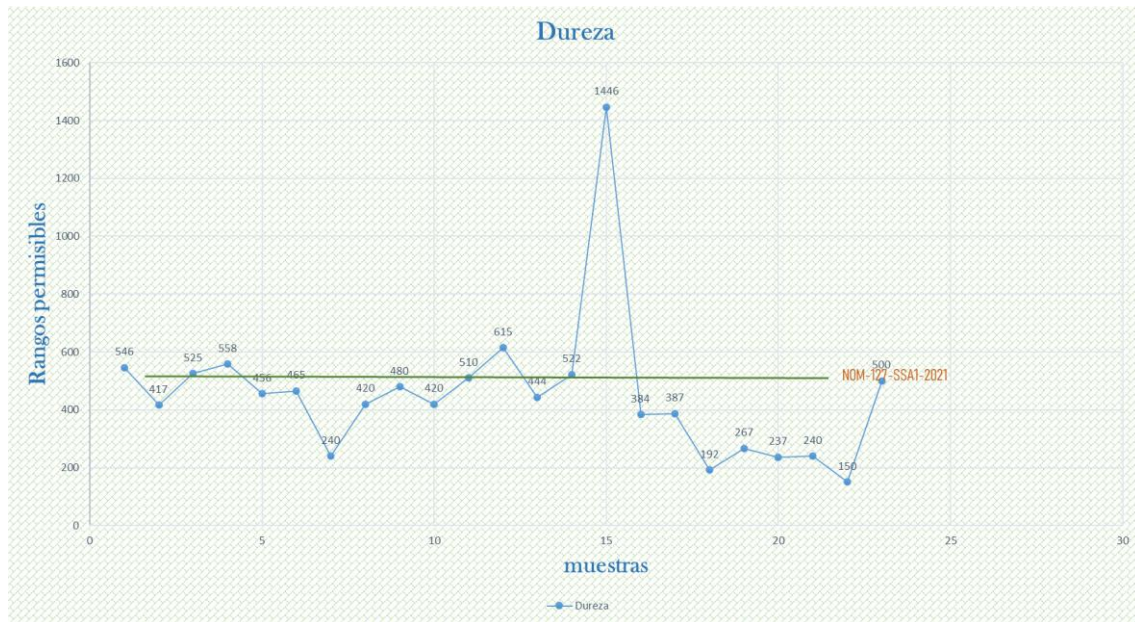
Tierra Nueva, S.L.P.



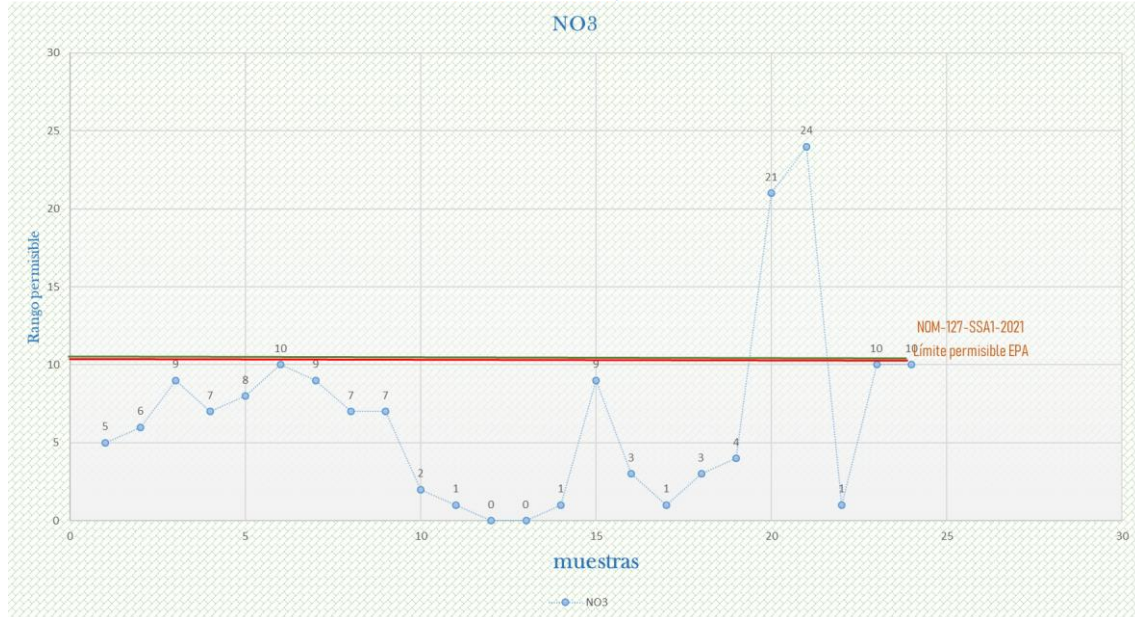
Tierra Nueva, S.L.P.



Tierra Nueva, S.L.P.



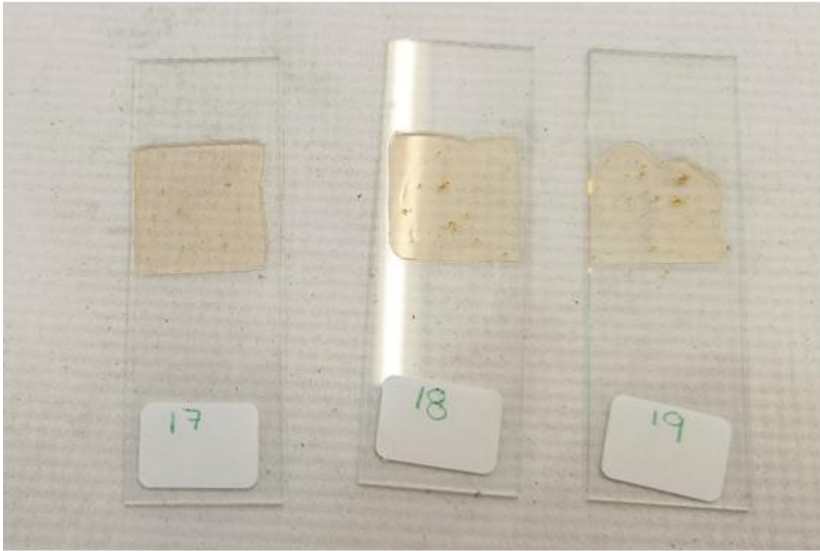
Tierra Nueva, S.L.P.



Índice de clorofila y Polen

Proceso de recolección de muestras en campo periodo de floración atípico en diciembre se recolectó flor de Huizache (*Acacia farnesiana*) y en marzo la flor de Mezquite (*Prosopis spp.*) en las siguientes imágenes se observa parte del proceso realizado en diferentes estaciones del año, preparado en laboratorio envasado, etiquetado, elaboración de láminas de polen, observado al microscopio, toma de microfotografías.

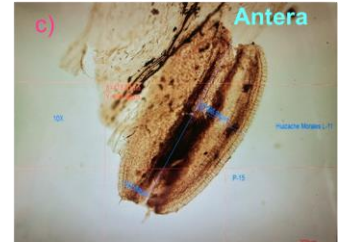
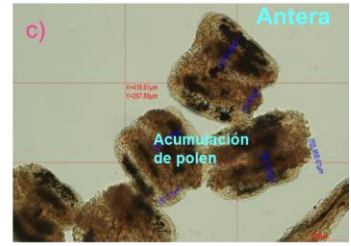
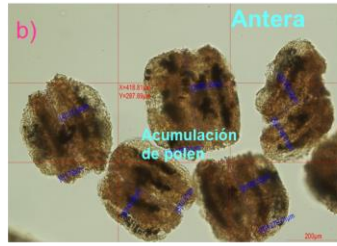
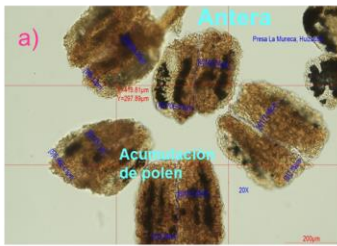






Reciente infiltración

Zona de salinización





Nódulos en Mezquite (*Prosopis spp*) saturación de sodio o estrés osmótico



Grietas en Huizache (*Acacia farnesiana*)



Mezquite (*Prosopis spp*) mortalidad regresiva Morales- Salitre Grande



Huizache (*Acacia farnesiana*) Presa La Muñeca



Equipo de medición de la clorofila (SPAD-502; Relative chlorophyll content)