

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**GEOQUÍMICA DEL FLUORURO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN
LA REGIÓN DE CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO**

POR:

ING. MARÍA FERNANDA ESPINO BARRIOS

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRA EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

FEBRERO 2023



"Geoquímica del Fluoruro en el Agua Subterránea en la Región de Chihuahua, Chih., México". Tesis presentada por María Fernanda Espino Barrios como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ingeniería en Hidrología, ha sido aprobada y aceptada por:

M.I. Fabián Vinicio Hernández Martínez
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Fernando Martínez Reyes
Secretario de Investigación y Posgrado

M. I. Miguel Ángel González Núñez
Coordinador Académico

Dr. Juan Carlos Burillo Montúfar
Director de Tesis

Febrero 2023

Fecha

COMITÉ

Dr. Juan Carlos Burillo Montúfar
Dr. Antonio Cardona Benevides
Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Dra. Angélica Oviedo García



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

01 de febrero de 2023.

ING. MARÍA FERNANDA ESPINO BARRIOS
Presente.

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dr. Juan Carlos Burillo Montúfar** para que lo desarrolle como tesis, con el título **“GEOQUÍMICA DEL FLUORURO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA REGIÓN DE CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO”**.

Índice de Contenido

Agradecimientos

Créditos institucionales

Resumen

Índice de contenido

Índice de tablas

Índice de figuras

Capítulo 1: Introducción

1.1 Estado del arte

1.2 Justificación

1.3 Hipótesis

1.4 Objetivos

Capítulo 2: Descripción de la zona de estudio

2.1 Localización y delimitación del área de estudio

2.2 Clima

2.3 Tipos de suelos

2.4 Uso de suelo y vegetación

2.5 Hidrografía

2.6 Provincias y subprovincias fisiográficas

2.7 Fisiografía y geomorfología

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Capítulo 3: Contexto geológico

3.1 Geología

3.2 Hidrogeología

Capítulo 4: Metodología

4.1 Criterios de selección de los puntos de muestreo

4.2 Material y equipo

4.3 Muestreo de agua y determinación de parámetros de campo

4.5 Análisis químico

Capítulo 5: Resultados de campo y laboratorio

5.1 Resultados de campo

5.2 resultados de laboratorio

Capítulo 6: Interpretación hidrogeoquímica y de calidad del agua

6.1 Condición de electroneutralidad

6.2 Determinación de familias de agua

6.3 análisis de correlación

6.4 Análisis estadístico

6.5 Análisis estadístico por aprovechamiento y familia de agua

6.6 Calidad del agua con respecto al uso y consumo humano

Capítulo 7: Geoquímica del fluoruro disuelto en el agua subterránea

7.1 Familias de agua y la concentración de fluoruro

7.2 Relación entre el Litio-Flúor

7.3 Geotermómetros

7.4 Hidrotermalismo

7.5 Análisis estadístico de los componentes principales

7.6 Composición mineralógica y su relación con el fluoruro

7.7 Índices de saturación mineral

7.8 Especie acuosa estable del fluoruro

7.9 Controles de solubilidad con respecto al fluoruro

7.10 Modelo geoquímico conceptual para el fluoruro disuelto en el agua subterránea

7.11 Comparación con otros estudios

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Capítulo 8: Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

8.2 Recomendaciones

Referencias

Apéndice

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares del documento terminal.

A T E N T A M E N T E

“Naturam subiecit aliis”

EL DIRECTOR

**M.I. FABIÁN VINICIO HERNÁNDEZ
MARTÍNEZ**

**FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.**



DIRECCIÓN

**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO**

DR. FERNANDO MARTÍNEZ REYES

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx

Dedicatoria

A mi amada mamá y a mi corazoncito, Kira. Son la alegría de mis días.

A mis tíos Manuel, Fernando, Karina, Guadalupe y Marina.

A mis primos Ximena, Estefany y Raúl.

A mis compañeros y amigos, Shugey Rodríguez y René Baeza.

A Aneth Pérez, Carlos Flores, Daniel Gutiérrez, David Contreras, Andrea Ornelas, Daniela García y

David Morales. Gracias por su amistad.

A todas mis versiones posibles.

"Tomaremos un tiempo para hacer las cosas que nunca hemos hecho... Tan seguro como que el

Kilimanjaro se eleva como el Olimpo sobre el Serengueti..."

- Toto

Agradecimientos

Agradezco a cada uno de los profesores que me impartieron clases durante la maestría, pero en especial al Dr. Villalobos Aragón, Dr. Silva Hidalgo, M.I. Velázquez Cázares, Dra. Espino Valdés, Dra. Estrada Gutiérrez (†) y M.I. Tonche Ramos; así como al coordinador M.I. Miguel Ángel González Núñez y al Ing. Abundio Osuna Vizcarra, por toda su orientación, apoyo moral y consejos en las diferentes etapas.

Del mismo modo, agradezco al Ing. Rafael Guardado de la Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, por su ayuda e información proporcionada para diferentes proyectos.

Profundos agradecimientos a los integrantes de este proyecto por parte de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, conformado por el M.I. Cristian Rivera, Ing. Anabel Estrada García y Dr. Isidro Montes Ávila. Así como el equipo de la Universidad Autónoma de Chihuahua, el Ing. Daniel Olvera Zapata e Ing. Alessandra Estrada Carrillo, por sus aportaciones y enseñanzas durante el desarrollo de este proyecto. Al igual que a la Dra. María de Lourdes Ballinas Casarrubias y M.C. Pamela Silva Escalante, de la Facultad de Ciencias Químicas.

También quiero agradecer a quiénes estuvieron presentes durante y posteriormente a mi estancia en San Luis Potosí, la Dra. María Elena García Arreola, Dr. Sócrates Alonso Torres, Dr. Cristóbal Aldama, Ing. Octavio Ortíz Enríquez, Ing. Heriberto González Sánchez y especialmente al LCQ Héctor Alejandro Escalante, por su conocimiento y asistencia en los análisis químicos.

Al personal de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento, muchas gracias por su aportación, especialmente a Diego Rivera y la Dra. Carmen Julia Navarro.

A mis compañeros de clases, René Baeza y Shugey Rodríguez. René, gracias por permitirme hacer este recorrido contigo, por las peleas, bromas y amistad. Shugey, no tengo las palabras suficientes para agradecerte todo lo que has hecho por mí, has sido una gran compañera y amiga, tu orientación y motivación han sido un pilar muy importante para mí todo este tiempo. A ambos, les deseo el mayor éxito del mundo.

Agradecimientos especiales al Dr. Nelson Aguilar Palma de la Facultad de Zootecnia y a la Ing. Irianyt González Rojas, Dra. Angélica Oviedo, Dr. Ignacio Reyes y Dr. Miguel Franco, por su tiempo y guía en sus respectivas áreas. Infinitas gracias al Dr. Juan Carlos Burillo Montúfar y al Dr. Antonio

Cardona Benavides, por su dirección, apoyo, conocimiento, comentarios y confianza, durante cada una de las fases de este proceso.

Muchas gracias a mi familia y amigos por su cariño, motivación y por creer en mí. Quisiera extender un especial agradecimiento a Aneth Pérez, quien ha estado a mi lado, gracias por tantos años de amistad, por tus consejos, por motivarme, por tu cariño, no tengo las palabras para expresar lo agradecida que estoy contigo. A Carlos Flores y Daniel Gutiérrez, por ser y estar presentes desde hace años, por las largas charlas, por ayudarme a ver las cosas de diferente manera, por creer en mí y por todos los momentos compartidos. A David Contreras, David Morales, Daniela García y Andrea Ornelas, por su amistad y su constante apoyo. A todos les agradezco por lo que han aportado a mi vida, la alegría que me brindan, por siempre estar presentes y, sobre todo, cuando más los he necesitado.

A mi mamá... Estoy increíblemente agradecida, has sido y siempre serás una parte esencial en mi vida, gracias por tu amor, soporte, consuelo, paciencia y motivación incondicionales. Gracias por ayudarme a ver más allá y ser mi pilar en todo momento. Te amo infinitamente.

Quiero, finalmente, agradecer a mi versión más joven... gracias por tus metas, tus sueños, tus miedos, tus ganas de lograr lo que quieres, tus inseguridades, tus aprendizajes, porque todo eso nos ha permitido llegar hasta donde estamos, este trabajo será un recordatorio de que eres y siempre has sido capaz de lograr lo que te propongas, aunque existan dudas. Gracias a mi versión "actual" porque a pesar de todo seguimos aprendiendo, aun con inseguridades has dado todo lo que has podido de ti, has buscado ayuda y estás en un proceso constante de mejora, de conocimiento y crecimiento personal, hay altas y bajas, pero alcanzaremos todo. A mi futura yo, espero que en algún punto podamos ver que todo el camino recorrido, en todo sentido, nos impulsa a lograr nuestras metas y más grandes sueños, a nuestro propósito, a nuestra mejor versión. Te amo.

Créditos Institucionales

Esta investigación se llevó a cabo como parte del **Proyecto Ciencia de Frontera 2019** “Fuentes geogénicas y mecanismos de movilización de arsénico, fluoruro y uranio a sistemas de flujo de agua subterránea en la Sierra Madre Occidental, México”, de la Convocatoria CONACYT, cuyo responsable técnico es el **Dr. Antonio Cardona Benavides**, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), en colaboración con el **Dr. Juan Carlos Burillo Montúfar** como corresponsable técnico, de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH). La identificación de elementos mayores, menores y traza se realizó en los laboratorios de Análisis de Agua y de Geoquímica de la UASLP, gracias al apoyo de la **Dra. María Elena García Arreola, Héctor Escalante y Miguel Cortina Rangel**. La determinación de fluoruros se efectuó en el laboratorio de Química Analítica de la Facultad de Ciencias Químicas de la UACH, con apoyo de la **Dra. María de Lourdes Ballinas Casarrubias y M.C. Pamela Silva Escalante**.

Así mismo, este proyecto contó con la colaboración de la **Dra. Carmen Julia Navarro Gómez** y **Diego Rivera**, de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento, permitiendo en conjunto el recorrido, revisión y acceso a los pozos de abastecimiento de la ciudad de Chihuahua.

Resumen

El agua subterránea constituye el principal suministro a la ciudad de Chihuahua, donde la cuestión de calidad hídrica es muy importante, evaluada a través de diferentes iones presentes, uno de ellos el fluoruro (F^-). Su presencia en el agua para abastecimiento se ha estudiado en países de Latinoamérica, norte de África y Medio Oriente, siendo Etiopía el país con las mayores concentraciones (45.2 mg/L). En México, Michoacán ha alcanzado 17 mg/L en aguas de tipo geotérmico, mientras que Chihuahua ha alcanzado los 6.76 mg/L en el agua de abastecimiento. La geología regional en la zona incluye rocas carbonatadas (Cretácico), rocas extrusivas félsicas que constituyen la principal fuente de F^- disuelto en el agua subterránea (Paleógeno) y relleno de fosas tectónicas. El estudio tuvo como principal objetivo identificar la geoquímica del fluoruro en el agua subterránea. La selección de los sitios de muestreo consideró estudios previos que identificaron agua con valores elevados de fluoruro y la disponibilidad de cortes litológicos de pozos. Se determinó la alcalinidad total y se tomaron parámetros en campo como temperatura, pH, oxígeno disuelto (O.D.), conductividad eléctrica (C.E.) y potencial óxido-reducción (ORP). En el laboratorio se determinaron elementos mayores, menores y traza. Se identificó la relación entre las altas concentraciones de F^- disuelto y la familia bicarbonatada sódica ($NaHCO_3$), la temperatura del agua mayor a 25°C y pH superior a 7.2. La interpretación hidrogeoquímica incluye la asociación de las familias de agua con las principales unidades geológicas, identificando que la disolución de minerales presentes en las rocas volcánicas favorecen el cambio de composición química del agua; la correlación de diferentes elementos con el F^- y la identificación de controles de solubilidad que justifican las concentraciones de éste en el agua subterránea.



Índice de Contenido

Agradecimientos	ix
Créditos Institucionales	xi
Resumen	xii
Índice de Contenido	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras.....	xvi
Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Estado del arte.....	1
1.2 Justificación	13
1.3 Hipótesis	15
1.4 Objetivos.....	15
Capítulo 2: Descripción de la zona de estudio.....	16
2.1 Localización y delimitación del área de estudio	16
2.2 Clima.....	17
2.3 Tipo de suelos	19
2.4 Uso de suelo y vegetación	21
2.5 Hidrografía.....	23
2.6 Provincias y subprovincias fisiográficas	24
2.7 Fisiografía y geomorfología	28
Capítulo 3: Contexto geológico	31
3.1 Geología.....	31
3.2 Hidrogeología	55
Capítulo 4: Metodología	61
4.1 Criterios de selección de los puntos de muestreo	61
4.2 Material y equipo	63
4.3 Muestreo de agua y determinación de parámetros de campo	64
4.4 Análisis químico	67

Capítulo 5: Resultados de campo y laboratorio	76
5.1 Resultados de campo	76
5.2 Resultados de laboratorio	79
Capítulo 6: Interpretación hidrogeoquímica y de calidad del agua	81
6.1 Condición de electroneutralidad	81
6.2 Determinación de familias de agua.....	84
6.3 Análisis de correlación	92
6.4 Análisis estadístico por familia de agua	94
6.5 Análisis estadístico por aprovechamiento y familia de agua.....	98
6.6 Calidad del agua con respecto al uso y consumo humano.....	102
Capítulo 7: Geoquímica del fluoruro disuelto en el agua subterránea.....	107
7.1 Familias de agua y la concentración de fluoruro	107
7.2 Relación entre el Litio-Flúor	110
7.3 Geotermómetros	113
7.4 Hidrotermalismo	116
7.5 Análisis estadístico de los componentes principales	117
7.6 Composición mineralógica y su relación con el fluoruro.....	122
7.7 Índices de saturación mineral	125
7.8 Especie acuosa estable del Fluoruro	128
7.9 Controles de solubilidad con respecto al fluoruro	129
7.10 Modelo geoquímico conceptual para el fluoruro disuelto en el agua subterránea	131
7.11 Comparación con otros estudios.....	138
Capítulo 8: Conclusiones y recomendaciones	140
8.1 Conclusiones.....	140
8.2 Recomendaciones	144
Referencias	145
Apéndice	157
Apéndice I. Tablas de resultados químicos de las muestras de agua.....	157
Apéndice II. Diagramas de Collins del total de muestras.....	164
Apéndice III. Diagramas de Stiff del total de muestras.....	168
Apéndice IV. Diagramas de cajas y bigotes de parámetros fisicoquímicos. Clasificación por familia y grupo-familia.	172

Índice de Tablas

Tabla 1. Hidrogeoquímica del fluoruro a nivel mundial.	2
Tabla 2. Hidrogeoquímica del fluoruro a nivel nacional	4
Tabla 3. Efectos del fluoruro en la salud humana.....	14
Tabla 4. Especificaciones de Cartas Geológico-mineras.....	31
Tabla 5. Resumen adaptado de las unidades hidroestratigráficas.....	55
Tabla 6. Material y equipo utilizado en campo.	63
Tabla 7. Dilución para la determinación de sulfatos según los rangos de conductividad eléctrica.....	70
Tabla 8. Resultados obtenidos en campo.....	77
Tabla 9. Resultados de laboratorio de iones mayores y fluoruro.....	79
Tabla 10. Número de muestras por tipo de aprovechamiento y familia.	85
Tabla 11. Coeficientes de correlación de parámetros físico-químicos. Análisis global.	92
Tabla 12. Coeficientes de correlación de parámetros físico-químicos. Análisis de pozos.	93
Tabla 13. Análisis estadístico descriptivo por familia de agua.....	95
Tabla 14. Análisis estadístico del grupo I.....	99
Tabla 15. Análisis estadístico del grupo II.	100
Tabla 16. Límites máximos permisibles de calidad del agua. Constituyentes químicos.....	102
Tabla 17. Número y porcentaje de muestras fuera de la norma.	103
Tabla 18. Clasificación del agua para riego según el riesgo de acumulación de sodio.....	105
Tabla 19. Análisis estadístico por familia. Muestras de agua subterránea (pozos).	108
Tabla 20. Ecuaciones para el cálculo de temperatura para geotermómetros seleccionados.....	115
Tabla 21. Resultados de los geotermómetros aplicados.	116
Tabla 22. Cargas factoriales tras rotación varimax.....	118
Tabla 23. Estadística descriptiva de grupos de Clusterización Aglomerativa Jerárquica.	121
Tabla 24. Comparación de estudio actual y estudios previos.	138

Índice de Figuras

Figura 1. Modelo global de probabilidad de concentraciones de fluoruro en agua subterránea que excede los límites de la Organización Mundial de la Salud de 1.5 mg/L para agua potable	10
Figura 2. Distribución de la contaminación de fluoruro en el agua subterránea en la República Mexicana.....	10
Figura 3. Calidad del agua en el estado de Chihuahua, parámetro: fluoruros.....	11
Figura 4. Localización del área de estudio. Imagen satelital obtenida del Servicio Geológico de Estados Unidos.....	16
Figura 5. Distribución de los tipos de clima en el área de estudio.	18
Figura 6. Distribución de los tipos de suelo en el área de estudio.....	19
Figura 7. Distribución de los diferentes usos de suelo y vegetación en el área de estudio.	22
Figura 8. Hidrografía y topografía del área de estudio.....	23
Figura 9. Sección hidrogeológica esquemática de la Provincia Sierra Madre Occidental.	25
Figura 10. Sección hidrogeológica esquemática de la Provincia Cuencas aluviales del Norte.....	26
Figura 11. Provincias y subprovincias en el área de estudio.	27
Figura 12. Sistemas de topofomas que se encuentran en el área de estudio.	29
Figura 13. Panorámica de la Formación Rara, localidad Los Filtros	32
Figura 14. Formación Las Vigas, localidad Cuchillo Parado.....	33
Figura 15. Sierra El Morrión, Aldama.....	39
Figura 16. Sierra El Cuervo.....	44
Figura 17. Columna litoestratigráfica tipo para la zona central del estado de Chihuahua. Simbología del Servicio Geológico Mexicano.	45
Figura 18. Representación gráfica de fosas tectónicas.	47
Figura 19. Geología regional del área de estudio.	50
Figura 20. Localización de los cortes litológicos de la JCAS- CNA y secciones geológicas.	51
Figura 21. Localización de las secciones geofísicas de estudios previos de la JCAS.....	52
Figura 22. Sección geológica A-A' con información geofísica de la JCAS.	53
Figura 23. Sección geológica B-B' con información geofísica de la JCAS.	53
Figura 24. Sección geológica C-C' con información geofísica de la JCAS.	54
Figura 25. Unidades hidroestratigráficas y direcciones de flujo en la región centro-norte de la zona de estudio.....	56
Figura 26. Unidades hidroestratigráficas y direcciones de flujo en la región centro-sur de la zona de estudio.....	57
Figura 27. Unidades hidroestratigráficas y direcciones de flujo en la región centro-sureste de la zona de estudio.....	58
Figura 28. Campaña de muestreo, junio 2021.	62
Figura 29. Pozo C-6 de la campaña de muestreo	62
Figura 30. Pozo C-9 de la campaña de muestreo.	63
Figura 31. Sonda Multiparamétrica YSI Professional Plus.....	64
Figura 32. Potenciómetro. Determinación de la alcalinidad (Método de Titulación de Gran).	65
Figura 33. Preparación para la toma de muestras de agua en recipientes de diferente capacidad.....	66
Figura 34. Preparación y medición de pH de las muestras recolectadas en campo (UASLP).	68
Figura 35. Preparación de las muestras para la determinación de alcalinidad (UASLP).	69
Figura 36. Determinación de sulfatos (UASLP)..	71
Figura 37. Neutralización de las muestras de agua para la determinación de nitratos (UASLP).....	72
Figura 38. Determinación de cloruros (UASLP).....	73

Figura 39. Análisis multielemental en ICP-MS (UASLP)..	74
Figura 40. Análisis multielemental en ICP-OES (UASLP)..	75
Figura 41. Balance de electroneutralidad por muestra.	82
Figura 42. Representación del Diagrama de Collins de las primeras ocho muestras.	83
Figura 43. Diagrama de Piper para la determinación de tipos de agua.	85
Figura 44. Diagrama de Durov.	86
Figura 45. Diagramas de Schöeller de muestras de pozos. Tipo de agua bicarbonatada sódica y mixta.	88
Figura 46. Diagramas de Schöeller de muestras de pozos, norias, manantiales, presas y lluvia. Tipo de agua bicarbonatada mixta y cálcica.	89
Figura 47. Distribución de los diagramas de Stiff en el área de estudio.	91
Figura 48. Diagrama de caja.	96
Figura 49. Diagramas de cajas de parámetros físico-químicos. Análisis por familia.	97
Figura 50. Diagramas de cajas de parámetros físico-químicos. Análisis por grupo y familia.	101
Figura 51. Diagrama de Wilcox. Porcentaje de sodio.	104
Figura 52. Diagrama de Wilcox para la clasificación del agua según el RAS.	106
Figura 53. Diagrama de caja para la concentración de fluoruro. Análisis por grupo y familia.	107
Figura 54. Relación espacial del fluoruro, temperatura y el factor geológico-estructural.	109
Figura 55. Interpolación por inverso de la distancia (IDW) del calcio, sodio, temperatura y fluoruro.	110
Figura 56. Relación del fluoruro y litio en los pozos dentro de la zona de estudio.	111
Figura 57. Localización de los sistemas de flujo.	112
Figura 58. Dendograma resultado de la clusterización.	120
Figura 59. Localización de agrupaciones (CAJ).	122
Figura 60. Índice de saturación de la fluorita y la concentración de litio (pozos).	126
Figura 61. Índice de saturación de la fluorita y la concentración de arsénico (pozos).	127
Figura 62. Índice de saturación de la fluorita y la concentración de boro (pozos).	127
Figura 63. Diagrama Eh-pH.	128
Figura 64. Diagramas de especiación para una concentración de fluoruro (F ⁻).	129
Figura 65. Diagrama de estabilidad de la fluorita.	130
Figura 66. Modelo conceptual en planta. Distribución de familias y piezometría.	131
Figura 67. Sección hidrogeoquímica A-A'.	134
Figura 68. Sección hidrogeoquímica B-B'.	135
Figura 69. Sección hidrogeoquímica C-C'.	136
Figura 70. Modelo conceptual del enriquecimiento de fluoruro.	137



Capítulo 1: Introducción

1.1 ESTADO DEL ARTE

El agua subterránea es el principal suministro de agua en el estado de Chihuahua. Al localizarse en una zona semiárida, la cuestión de la cantidad y calidad hídrica es de gran importancia. La extracción desmedida de este recurso, además de la poca precipitación (y menor recarga) y la alta evaporación, podría estar repercutiendo en la concentración de diversos iones presentes en el agua subterránea de los sistemas acuíferos. Tal es el caso del fluoruro, cuya presencia puede originarse por la interacción geoquímica del agua subterránea con el material geológico con el que tiene contacto. Diversos estudios, como el realizado por Dey & Giri (2016), han demostrado que a medida que la concentración de fluoruro en el agua potable aumenta, se tienen efectos nocivos en la salud, desde fluorosis dental (>1.5 mg/L) hasta daños más graves como la fluorosis ósea (>4 mg/L). Con la finalidad de evaluar la concentración actual y distribución de fluoruro en la región de Chihuahua, Chih., se realizó un estudio dentro del área delimitada por los acuíferos administrativos Chihuahua-Sacramento, El Sauz-Encinillas y Tabalaopa-Aldama.

En varios países alrededor del mundo se han realizado estudios y análisis de esta índole, en la Tabla 1 se resumen los resultados de algunos de éstos, siendo Etiopía el país con la concentración de fluoruro más alta (45.2 mg/L). En la Tabla 2, se resumen los resultados de investigaciones realizadas a nivel nacional, de entre las cuales destacan las concentraciones en Michoacán (reservorios geotérmicos) de 17 mg/L.

Es claro el gran aporte que ofrecen las rocas ígneas sobre la ocurrencia del fluoruro; además, la temperatura y el pH son factores importantes, pues a medida que la temperatura aumenta, la cantidad de fluoruro en el agua es mayor; por otro lado, el pH en el que se presentan estas condiciones es alcalino.



Tabla 1. Hidrogeoquímica del fluoruro a nivel mundial.

NIVEL MUNDIAL									
País	[F ⁻] mg/L	Litología	Reacciones Procesos	Coefficientes de correlación	T (°C)	pH	Tipo de agua	Controles de solubilidad	Bibliografía
ARG	0.03 – 28.4	Loess, aluvión, vidrio y ceniza volcánica y basamento cristalino	Disolución de carbonatos, evaporación, intercambio catiónico, adsorción, geotermalismo o hidrotermalismo	As(0.72-0.89) B(0.66) Ca(-0.91) Sr(-0.63) Fe(-0.75) V(0.88) Cr(0.64)	16.1-29.1	6.3 – 9.3	Ca-HCO ₃ (área de recarga) Na-HCO ₃ (área de descarga)	Fluorita Vidrio volcánico Calcita	(Alarcón-Herrera <i>et al.</i> , 2012) (Barranquero <i>et al.</i> , 2017) (Smedley <i>et al.</i> , 2002)
CMR	0.19-15.2	Granito (pegmatitas), gneis, aluvión, basalto, riolita, esquisto, traquita, vulcano-sedimentarios	Disolución (medio alcalino), hidrotermalismo, intercambio iónico	Na/Na+Ca(0.71)	26-35	6.8-8.0	Ca-HCO ₃ ⁻ (<1.5 mg/L F ⁻) Na-HCO ₃ ⁻ (> 1.5 mg/L F ⁻)	Fluorita	(Fantong <i>et al.</i> , 2010)
CHL	0.8 – 8.5	Ignimbrita	Geotermalismo, evaporación	Na ⁺ /Ca ⁺	265 °C	>8?	Na-Cl (descarga)	Calcita Fluorita	(Alarcón-Herrera <i>et al.</i> , 2012)
CHN	0.1-14.2	Granito, sienita, sedimento aluvial-lacustre-pluvial, gneis, basalto, caliza, arenisca, loess, lutita, hornblendita, anfibolita, cuarcita	Disolución, evapotranspiración*, intemperismo, inclusiones, hidrólisis, precipitación, enriquecimiento, desorción, disolución	HCO ₃ ⁻ (-0.42-0.44) Ca(-0.43- -0.40) Mg(-0.53)	9.47-10.67	6.24 – 9.16	Na-HCO ₃ Na-HCO ₃ ·SO ₄ Na-Cl·SO ₄ Ca/Mg-Ca-HCO ₃ Na-HCO ₃ /SO ₄ ⁻ Cl/SO ₄ /Cl	Calcita Fluorita Dolomita Yeso Sellaita	(Su <i>et al.</i> , 2013) (Khair <i>et al.</i> , 2014) (Li <i>et al.</i> , 2013) (Pi <i>et al.</i> , 2015)
ETH	1.5-45.2	Riolita, toba, ignimbrita, sedimento fluvial-lacustre	Geotermalismo, adsorción, desorción, disolución, interacción roca/sedimento-agua, intercambio, fraccionamiento mineral	As(0.46-0.80)	17-80	6.2-9.9	Ca-HCO ₃ Na-HCO ₃	Fluorita	(Bianchini <i>et al.</i> , 2020)
GHA	0.38-1.95	Metavolcánica (lavas), metasedimentaria, granitoide, piroclastos, esquisto, filitas, granito de biotita, granodiorita de hornblenda-biotita, gneis de biotita	Disolución, intercambio iónico, intrusiones salinas, evaporación, transpiración extrema, actividad bioquímica	-	28.10-29.80	6.47-7.7	Na-HCO ₃	-	(Anim-Gyampo <i>et al.</i> , 2019)



IND	ND-18.5	Metamórficas (esquistos, gneis, cuarcitas), areniscas, lutita, caliza, lutita fílica, riolita, dolerita, pegmatita, coluvión, sienita, granito, charnockita, pegmatita, kankar	Disolución, adsorción, desorción, evaporación, intemperismo	As(0.19)	22-32	4.8-10.12	Ca-HCO ₃ Na-HCO ₃ *Na-Mg-Ca-HCO ₃ -Cl * Na-Mg-Cl-HCO ₃ * Na-Mg-HCO ₃ *el dominio de iones varía	Calcita Fluorita	(Das <i>et al.</i> , 2018) (Yadav <i>et al.</i> , 2020) (Kumar, 2021)
ITA	0.1-6.1	Depósitos arenosos y arcillosos, rocas vulcano-sedimentarias, caliza, depósitos aluviales	Oxidación, hidrotermalismo, intemperismo químico, disolución	As(0.59-0.61) K(0.61)	5.3 – 25.7	5.4-8.6	Ca-HCO ₃ Na+K-HCO ₃	Fluorita Calcita	(Parrone <i>et al.</i> , 2020)
PAK	0.19-6.8	Depósitos aluviales no consolidados y marinos, arenas, arcillas, limos, margas, caliza, dolomita, rocas ígneas y metamórficas.	Reacciones óxido-reducción, intercambio de iónico, evapotranspiración-condensación, intemperismo químico, disolución, lixiviación, evaporación	Ca(-0.47) Mg(-0.42) Na(0.57) Cl(0.45) HCO ₃ (0.54)	17-23	6.8-8.59	Ca/Mg-Ca-HCO ₃ Na-HCO ₃ /SO ₄ Cl/SO ₄ /Cl Ca/Mg-Ca-HCO ₃ Na-Cl Ca-HCO ₃ Na-Ca-HCO ₃ Na-HCO ₃	Calcita Fluorita	(Husain <i>et al.</i> , 2012) (Parvaiz <i>et al.</i> , 2021) (Talpur <i>et al.</i> , 2020)
TUN	4 – 22 (2013)	Depósitos detríticos, arenas, arcillas, marga, caliza, arenisca y conglomerado. Ígneas y metamórficas.	Hidrotermalismo, evaporación	-	X - >25	6.5 – 8.5	Na-Ca-Cl-HCO ₃ Na-Ca-Cl-SO ₄ Na-Cl	-	(Ameur <i>et al.</i> , 2019)

Nota: ARG=Argentina; CMR=Camerún; CHL=Chile; CHN=China; ETH=Etiopía; GHA=Ghana; IND=India; ITA=Italia; PAK=Pakistán; TUN=Túnez.



Tabla 2. Hidrogeoquímica del fluoruro a nivel nacional

NIVEL NACIONAL									
Estado	[F ⁻] mg/L	Litología	Reacciones Procesos	Coefficientes de correlación	T (°C)	pH	Tipo de agua	Controles de solubilidad	Bibliografía
CHIH	0.023– 6.8	Riolita, conglomerado, aluvión, lutita, andesita, tobas, ignimbrita, basalto, caliza, arenisca, limolita	Evaporación, disolución, evapotranspiración, hidrólisis, intemperismo químico y físico, geotermalismo, desorción y adsorción.	As(0.55-0.83) Li(0.73) SO ₄ (0.43)	19.3- 39.5 (>80)	5.37-8.93	Na-HCO ₃ Na-Ca-HCO ₃	Fluorita Calcita	(Alarcón-Herrera <i>et al.</i> , 2012) (Ingeniería de Evaluación y Prospección S.A. de C.V., 1996) (Fernández-Franco, 2020) (Mahlknecht <i>et al.</i> , 2008) (Ocampo-Astudillo <i>et al.</i> , 2020) (Ontiveros-Terrazas <i>et al.</i> , 2020) (Reyes-Gómez <i>et al.</i> , 2013) (Reyes-Gómez <i>et al.</i> , 2015) (Burillo <i>et al.</i> , 2021)
COAH	1.2-16	Rocas ígneas extrusivas	Magmatismo	-	-	-	Na-HCO ₃	-	(Alarcón-Herrera <i>et al.</i> , 2012)
DGO	1.2-16	Riolita, ignimbrita, conglomerado, aluvión	Evaporación, magmatismo	-	-	-	Na-HCO ₃	-	(Alarcón-Herrera <i>et al.</i> , 2012)
JAL	0.0-4.9	Andesita, basalto, toba, riolítica, ignimbrita	Intemperismo, hidrotermalismo, disolución	-	-	-	Na>Ca>Mg>K- HCO ₃ >Cl>SO ₄ >NO ₃ Na-HCO ₃ Na-SO ₄	-	(Ocampo-Astudillo <i>et al.</i> , 2020)
GTO	0.1-16	Aluvión, caliza, lutita, conglomerado, ignimbrita, riolita, andesita, basalto, vulcano-sedimentos, arenisca, dacita, diorita, depósitos lacustres.	Hidrotermalismo/geotermalismo, disolución, intercambio catiónico en minerales arcillosos	As(0.2->0.5) Br(0.79) Cs(0.97) Na(0.3-0.84) HCO ₃ (-0.01-0.55) pH(0.51) Sr(-0.59) Cl(0.38-0.91) Li(0.19-0.95) Ca(-0.53- -0.42) Mg(-0.65- -0.14) B(0.83) K(-0.67) Ba(-0.64)	14-47	5-10	Na-HCO ₃ Na-Ca-HCO ₃	Fluorita	(Alarcón-Herrera <i>et al.</i> , 2012) (Knappett <i>et al.</i> , 2018) (Ortega-Guerrero, 2009)
MICH	0.7–17 90*	Rocas ígneas extrusivas	Geotermalismo, evaporación	As(0.68)	89-93	-	Na-HCO ₃	-	(Alarcón-Herrera <i>et al.</i> , 2012)



MOR	0.2-1.9	Riolita, ignimbrita, riolacita, basalto, diorita, granodiorita, cuarzo-sienita, sienita, brecha, arena tobácea, limonita, arcilla, caliza, dolomía, conglomerado, aluvión	Hidrólisis, disolución, intemperización química, reacciones óxido-reducción, hidratación	Na(0.59) NO ₃ (0.51)	22.3-33.31	6.5-8.1	Ca-Na-HCO ₃ Ca-Na-SO ₄ Na-Ca-HCO ₃	Fluorita	(Huizar-Álvarez <i>et al.</i> , 2016)
SLP	0.36-3.7	Conglomerado, aluvión, ignimbrita, riolita, latita, andesita, material calcáreo, arcillas	Evaporación, disolución, intercambio iónico, saturación mineral	As(0.68)	23-36.8	6.22-7.8	Na-HCO ₃	Fluorita Calcita	(Alarcón-Herrera <i>et al.</i> , 2012) (Cardona <i>et al.</i> , 2018) (Carrillo-Rivera <i>et al.</i> , 2002) (Ocampo-Astudillo <i>et al.</i> , 2020)
SON	1.5-7	Sedimentarias marinas, conglomerado, suelo aluvial, ígnea	Evaporación	As(0.92)	-	-	Na-HCO ₃	-	(Alarcón-Herrera <i>et al.</i> , 2012)
ZAC	0.35-3.60	Rocas vulcanoclásticas, aluvión, lava metabasáltica y metaandesítica, depósitos vulcano-sedimentarios, intrusiones lacolíticas, basalto, lutita, caliza, conglomerados, riolita	Disolución, intercambio iónico	As	21.0-34.7	6.3-8.34	Ca-Mg-Na-HCO ₃ -SO ₄ -Cl	Fluorita	(Navarro <i>et al.</i> , 2017)

Nota: CHIH=Chihuahua; COAH=Coahuila; DGO=Durango; JAL=Jalisco; GTO=Guanajuato; MICH=Michoacán; MOR=Morelos; SLP=San Luis Potosí; SON=Sonora; ZAC=Zacatecas



El fluoruro, al no ser el único ion disuelto en el agua, puede mantener una correlación con otros iones. De esta manera su presencia puede ser controlada por algunos de ellos, ya sea limitándose o incrementándose. Las correlaciones, que se han calculado en los estudios sintetizados en las tablas previamente mencionadas, han sido tanto positivas como negativas, es decir, que existen relaciones en las que el fluoruro aumenta (positiva) o disminuye (negativa), al aumentar la concentración de otro elemento.

En regiones áridas y semiáridas de Latinoamérica se han efectuado evaluaciones de la concentración del fluoruro en el agua subterránea, como la realizada por Alarcón-Herrera *et al.* (2012) en México, Argentina y Chile; y el estudio de Barranquero *et al.* (2017) en Argentina.

En México, millones de personas están expuestas a los posibles efectos de la alta concentración de fluoruro. Desde la perspectiva de la geología regional, se cree que los aluviones y el material ígneo son los responsables del origen de éste. En Durango, Coahuila y Guanajuato (zona minera), se han registrado concentraciones de hasta 16 mg/L, que sobrepasa por mucho el límite impuesto por la Organización Mundial de la Salud de 1.5 mg/L (Alarcón-Herrera *et al.*, 2012). En el caso de Guanajuato, la concentración aumenta con la presencia de cesio, litio, cloruro, bromuro y con el aumento de la temperatura del agua. En otras investigaciones (ver Tabla 2) se ha hecho hincapié en la correlación entre As-F, sin embargo, en el estado mencionado anteriormente se presenta una independencia química entre ambos iones, y se establece la disolución de fluorita como el origen del fluoruro (presente de igual forma en los estados de Coahuila, Zacatecas, San Luis Potosí y Querétaro) (Ortega-Guerrero, 2009).

Alarcón-Herrera *et al.* (2020) identificaron que las concentraciones más altas coinciden con la ubicación de los acuíferos aluviales al norte de México, donde se pueden encontrar rocas con alto contenido de sílice, además de relacionar estrechamente la ocurrencia de este ion (F⁻) con la aridez. Los estados de San Luis Potosí, Durango, Zacatecas, Jalisco, Chihuahua y Sonora son los más afectados (F⁻ > 4.5 mg/L).



En Zacatecas (formaciones Chilitos y Zacatecas), las muestras tomadas para la determinación de fluoruro (0.35-3.6 mg/L) también fueron analizadas para arsénico (0.0033-0.0754 mg/L); en análisis más extensos se encontró una correlación positiva entre ambos parámetros cuando el As presenta valores bajos y el calcio era el ion dominante, mientras que a comportamientos opuestos (altas concentraciones de As y la presencia no dominante de Ca), la correlación F-As desaparecía (Navarro *et al.*, 2017).

En San Luis Potosí, se han encontrado concentraciones que rebasan el límite permitido por la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) de 1.5 mg/L. El aumento de la extracción de agua subterránea ha sido un factor determinante en el alto contenido de fluoruro, tal impacto se refleja en el aumento de reportes de casos de fluorosis dental. Estas concentraciones se han relacionado especialmente con la presencia de derrames lávicos de la unidad denominada riolita San Miguelito, misma que presenta como fuente de fluoruro minerales como el topacio $[Al_2SiO_4(OH,F)_2]$ y fluorapatita $[Ca_5(PO_4)_3F]$ (Cardona *et al.*, 2018).

Otro estado que presenta esta problemática es Morelos, donde las concentraciones de fluoruro oscilan entre 0.5 y 1.9 mg/L. La litoestratigrafía dentro del área de estudio está compuesta de material vulcanoclástico, calizas, rocas ígneas extrusivas e intrusivas y metamórficas. Sin embargo, las rocas predominantes son los aluviones y conglomerados, derrames de lavas, material vulcanoclástico (intermedio-máfico), ignimbritas (sic) y riolitas, cuya conductividad hidráulica es gracias al fracturamiento. Se estimó una correlación de 0.343 entre el F⁻ y la temperatura. En puntos en los que la temperatura del agua era mayor a 25°C, la concentración del ion fue considerablemente más alta que en aquellos en los que la temperatura fue menor a este valor. De igual forma, esto también se atribuyó a un sistema de flujo intermedio y regional, ya que la extracción induce el ascenso de flujos profundos, los cuales poseen un mayor contenido de fluoruro. Se concluyó la existencia de una correlación concentración-temperatura-profundidad (Huízar-Álvarez *et al.*, 2016).



En cuanto al estado de Chihuahua, las rocas riolíticas poseen minerales (por ejemplo, biotita y apatitas) con un porcentaje de fluoruro de hasta 4.5 wt.% (Alarcón-Herrera *et al.*, 2012; Ren *et al.*, 2022). La parte centro-sur del estado de Chihuahua ha sido ampliamente analizada, abarcando alrededor de 13 municipios. La zona posee la aridez característica y la presencia de acuíferos a más de 100 metros de profundidad, estableciendo una relación con la geología regional, es decir, rocas volcánicas (riolitas y tobas) (González-Horta *et al.*, 2015).

Se detectó una zona de transición entre el acuífero Tabalaopa-Aldama hacia Laguna de Hormigas, en la que se registraron los más altos niveles de fluoruro. Dicha presencia se atribuye a los procesos de intemperismo en rocas sedimentarias e ígneas, al igual que por factores antropogénicos (Ocampo-Astudillo *et al.*, 2020).

Por su parte, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través de Consultores y Constructores del Norte, S.A. de C.V. y la Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS), realizaron una caracterización hidrogeoquímica en el acuífero Chihuahua-Sacramento, en la que las concentraciones de fluoruro presentaban altos valores al norte de la ciudad de Chihuahua (4 ppm) (CONAGUA, 2020a).

Del mismo modo, los análisis llevados a cabo en el acuífero El Sauz-Encinillas registraron concentraciones que exceden la Norma (entre 3.1 y 10.6 mg/L). Según estos resultados y los de otros iones examinados, se interpretó que son producto de la infiltración y circulación del agua a través de rocas volcánicas (CONAGUA, 2020b).

La geología involucrada en el área de Chihuahua incluye principalmente material de relleno de fosas tectónicas; rocas ígneas extrusivas y en menor medida, intrusivas; las rocas sedimentarias también son parte importante de la litología regional. Las reacciones químicas relacionadas a la presencia de fluoruro en el agua subterránea son la disolución, hidrólisis, adsorción, desorción, intercambio catiónico, entre otras reacciones y procesos, según los estudios que se mencionaron en la Tabla 1 y Tabla 2 en este trabajo.



Del mismo modo, dichas investigaciones establecen que la temperatura del agua oscila en un rango de 5 y 50 grados centígrados, algunas de éstas resaltan la influencia geotérmica, lo que provoca que la temperatura alcance valores más altos. Además, el pH obtenido en los análisis permite ver una ocurrencia repetida en ambientes alcalinos principalmente. También se relaciona con el intercambio iónico debido al intemperismo químico de las rocas y el grado de consolidación de acuíferos sedimentarios; al clima árido (induce mayor extracción del agua subterránea) y la obtención de agua a través de pozos más profundos (mayor cantidad de iones disueltos) (Kim *et al.*, 2012; Mahlkecht *et al.*, 2008). En las siguientes figuras se representa la distribución del fluoruro a nivel mundial (Figura 1), nacional (Figura 2) y estatal (Figura 3).

La Figura 1 es un claro ejemplo de la influencia del clima en las concentraciones de fluoruro en el agua, ya que los países con elevados valores de este ion se localizan especialmente dentro de las franjas subtropicales; si bien se observa presencia de F^- en países fuera de estas regiones, éstas concentraciones son menores. Las franjas subtropicales tienen una característica importante, y es que el clima es de semiárido a árido, propiciando menor precipitación, mayor evaporación y, por ende, mayor concentración de iones en el agua subterránea. También hay una fuerte relación entre el ion fluoruro y el contenido de bicarbonato y sodio, ya que éstos pueden favorecer su enriquecimiento; el tiempo de residencia, la estructura y la profundidad del sistema acuífero, son otras variables que condicionan el contenido de fluoruro en el agua (Huizar-Álvarez *et al.*, 2016; Kumar, 2021).

La concentración de fluoruro en el agua subterránea es controlada especialmente por procesos geogénicos (Amini *et al.*, 2008 ; Dey & Giri, 2016). Los minerales que forman parte de las rocas en estas zonas contienen fluoruro que puede liberarse (entre ellos, micas, anfíboles, apatitas y fluorita) (Amini *et al.*, 2008; Dey & Giri, 2016; Huizar-Álvarez *et al.*, 2016). Dicha liberación depende de los procesos químicos y físicos entre agua-roca y las condiciones del suelo (Amini *et al.*, 2008 ; Dey & Giri, 2016).

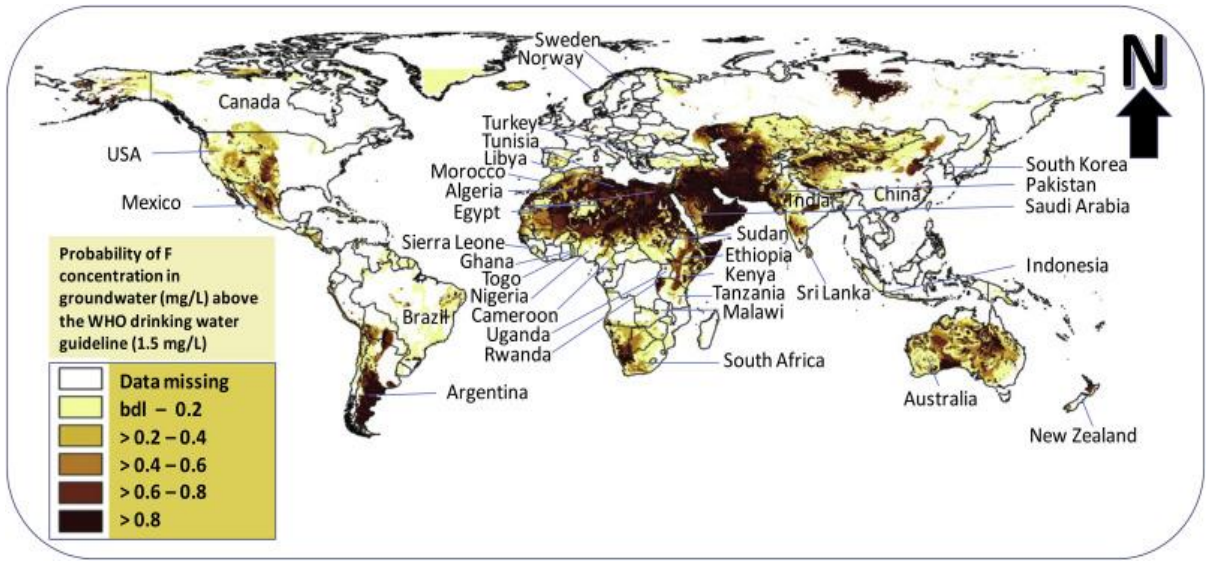


Figura 1. Modelo global de probabilidad de concentraciones de fluoruro en agua subterránea que excede los límites de la Organización Mundial de la Salud de 1.5 mg/L para agua potable (Kimambo *et al.*, 2019).

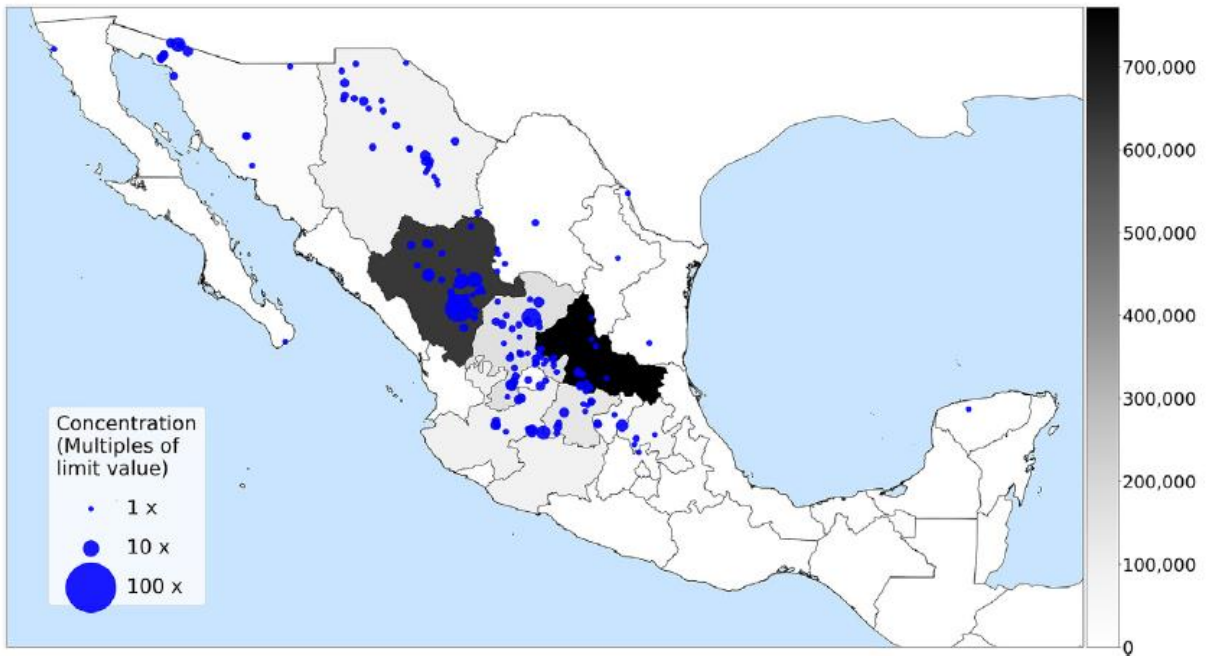


Figura 2. Distribución de la contaminación de fluoruro en el agua subterránea en la República Mexicana. Los estados presentan color (escala de grises) de acuerdo con el número de personas expuestas a fluoruro por encima de la dosis diaria segura de 0.06 mg/(kg**día*). Los círculos azules denotan sitios de muestreo con concentraciones de fluoruro por encima del límite de 1.5 mg/L, y representan los múltiplos del valor límite (Alarcón-Herrera *et al.*, 2020).

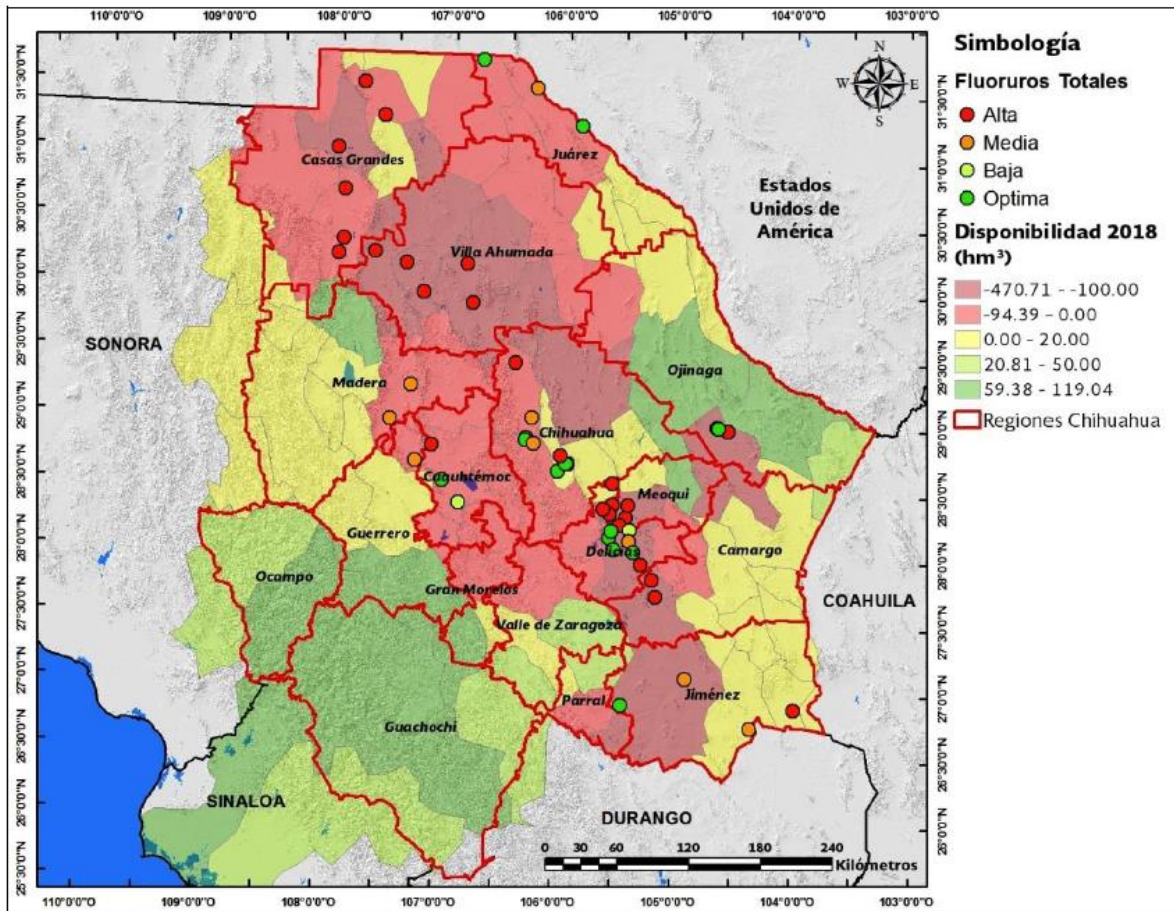


Figura 3. Calidad del agua en el estado de Chihuahua, parámetro: fluoruros.

Se clasifican como “altas” las concentraciones ≥ 1.5 mg/L; “medias” entre ≥ 0.4 y < 0.7 mg/L; “bajas” entre ≥ 0 y < 0.4 mg/L; y las concentraciones óptimas se encuentran entre ≥ 0.7 y < 1.5 mg/L (Junta Central de Agua y Saneamiento & Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2018 ; Comisión Nacional del Agua, 2019).

En el agua subterránea de regiones áridas se produce una oxidación en ambientes con pH alcalino, lo que propicia la disolución de sílice en vidrio volcánico y la desorción de elementos retenidos (Alarcón-Herrera *et al.*, 2020). El oeste del territorio mexicano, que comprende la Sierra Madre Occidental, está compuesto en su mayoría por riolitas y secuencias ignimbríticas. Se ha demostrado que las emisiones, ceniza y vidrio volcánico tienen grandes cantidades de fluoruro (Alarcón-Herrera *et al.*, 2020).

En la zona de Tabalaopa-Aldama, la roca expuesta consiste principalmente en riolitas, roca que se compone de cuarzo, ortoclasa, sanidina (feldespato alcalino – posee



potasio o sodio), illita y vidrio volcánico, y cantidades pequeñas de fluorapatita (Alarcón-Herrera *et al.*, 2012).

El fluoruro en el agua subterránea de Chihuahua se debe a diversos procesos que se combinan. A partir de una interpretación geoquímica se le atribuyó a la fragmentación-disolución de riolitas y lutitas, y a procesos de desorción (intercambio de Na en arcillas y el Ca en el agua) (Ocampo-Astudillo *et al.*, 2020).

Las aguas termales contienen altas concentraciones de diversos elementos, indicando que la temperatura favorece el proceso de hidrólisis o alteración, facilitando la movilidad de fluoruro en el agua subterránea. La transferencia de elementos tiende a ser más rápida en sedimentos (Bianchini *et al.*, 2020).

En la Tabla 1 y la Tabla 2 se mencionaron los posibles procesos físicos y químicos que contribuyen a la presencia del fluoruro en el agua. Como se aludió anteriormente, los lugares con mayores concentraciones (45.2 y 17 mg/L, en Etiopía y Michoacán, respectivamente) se relacionan con ambientes geotérmicos, ya que la temperatura propicia una mayor velocidad en las reacciones químicas. Otro factor importante en Michoacán es la baja concentración de calcio, ocasionando que por control de solubilidad de la fluorita se puedan tener valores muy elevados de fluoruro (Alarcón-Herrera *et al.*, 2012).

La evaluación de las concentraciones de fluoruro en el agua subterránea en la ciudad de Chihuahua se ha descrito en diversos estudios (Burillo *et al.*, 2021; Fernández-Franco, 2020; Mahlknecht *et al.*, 2008; Reyes-Gómez *et al.*, 2013); sin embargo, este trabajo de investigación buscó analizar otros puntos de muestreo para su posterior análisis en laboratorio, bajo procedimientos como electrodo de ion selectivo (F⁻), volumétrico (alcalinidad y Cl⁻), turbidimétrico (SO₄²⁻), colorimétrico (NO₃⁻) y espectrometría (ICP-MS e ICP-OES) para una determinación multielemental. Se crearon mapas (*ArcGIS*) con la intención de llegar a una explicación más detallada de su distribución, buscando establecer una relación con el factor geológico; además de complementar con una modelación hidrogeoquímica (*Geochemist's Workbench*) y análisis estadísticos (*Minitab* y *Excel*).



El modelo conceptual hidrogeoquímico se planteó al final del estudio, siendo el resultado del procesamiento de los datos obtenidos en campo y de los análisis químicos realizados; así como de la integración de la información geológica-estructural de la zona de estudio.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Se considera que la hidrogeoquímica del fluoruro no ha sido propiamente identificada y estudiada. Esta investigación se encuentra encaminada a conocer los tipos de familias de agua con las que se encuentra estrechamente relacionada la concentración de éste, así como identificar los controles de solubilidad a partir de índices de saturación y qué relación guardan con los sistemas de flujo subterráneo.

La calidad hídrica es un factor importante a nivel regional, pues el principal suministro de agua potable a la población son los sistemas acuíferos, en los cuales existe una constante interacción con el medio, llevando a cabo una gran variedad de procesos químicos. Es por ello que, aunque ya se han efectuado estudios previos, es importante ejecutar un análisis en otros puntos dentro del área de interés para conocer el estado actual de los niveles de fluoruro en el agua subterránea. Un ejemplo es la investigación de Fernández-Franco (2020), en la cual 80% de las muestras presentaba alta concentración de este anión.

La caracterización hidrogeoquímica es una herramienta esencial que, aunada al análisis de distribución espacial, permite establecer una relación con el material geológico, además de identificar los puntos críticos dentro del área de estudio.

En el Plan Estatal Hídrico 2040 de Chihuahua se hace mención del monitoreo de diferentes parámetros, entre los cuales se puede encontrar el fluoruro, donde el 50% de los pozos monitoreados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) cuentan con la clasificación de “alta concentración” (JCAS & IMTA, 2018).



De los efectos ocasionados por las altas concentraciones y prolongada exposición al fluoruro, el estudio y evaluación de la fluorosis dental se ha llevado a cabo en territorio estatal. En el caso del municipio de Julimes (Chihuahua) hay gran prevalencia de fluorosis dental, con altos porcentajes en personas de 12 años en adelante (Ontiveros-Terrazas *et al.*, 2020). Cabe resaltar que también pueden presentarse cambios metabólicos, como problemas en la tiroides, riñones, hígado, etc. En la Tabla 3 se presentan datos recolectados de un estudio realizado por la Universidad Estatal de Bengala Occidental, en India.

Tabla 3. Efectos del fluoruro en la salud humana (Dey & Giri, 2016).

Concentración	Exposición	Efectos fisiológicos
> 4 ppm	Crónica	Fluorosis esquelética, fluorosis dental, hipomineralización del esmalte dental
> 1 ppm	Crónica	Deterioro del metabolismo de la glucosa, tanto en animales como humanos.
Alto contenido	Crónica	Aumenta riesgo de padecer Alzheimer
Alto contenido	Crónica	Aumento crónico en los niveles de la hormona foliculoestimulante (FSH) que ayuda al control del desarrollo de óvulos y espermatozoides, y la hormona luteinizante (HL) que controla el desarrollo y funcionamiento sexual. Disminución de niveles de testosterona. Reducción de hormonas tiroideas. Perturbación de relación andrógenos-estrógenos.
Exposición regular durante el desarrollo dental		Protección contra la fluorosis del esmalte en la edad adulta
≥1.5 mg/L (agua)	Ingesta diaria	Produce resistencia a la insulina, fluorosis dental
0.05 - 0.07 mg/kg	Ingesta diaria	Minimiza el riesgo de fluorosis dental



1.3 HIPÓTESIS

Los diferentes grados de concentración de fluoruro en el agua subterránea se deben al intemperismo químico de las rocas presentes y/o de sedimentos aluviales. Principalmente debido a la disolución de feldespatos y de minerales que contienen F^- .

1.4 OBJETIVOS

Objetivo General. Evaluar las concentraciones actuales de fluoruro en el agua subterránea, identificar minerales que controlan su máxima concentración e identificar las condiciones en las que se limita o favorece su presencia.

Objetivos específicos.

- Identificar las concentraciones de fluoruro en el agua subterránea y evaluar su relación con la composición química de ésta.
- Identificar controles de solubilidad.
- Evaluar la distribución espacial e identificar la relación con el contexto geológico-estructural.
- Definir el modelo hidrogeoquímico conceptual que justifica la presencia de fluoruro en el agua subterránea.

Capítulo 2: Descripción de la zona de estudio

2.1 LOCALIZACIÓN Y DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza en la porción centro del estado de Chihuahua, extendiéndose principalmente en el municipio de Chihuahua y en porciones de los municipios de Aldama y Aquiles Serdán (Figura 4). El área cubre alrededor de 3,500 km².

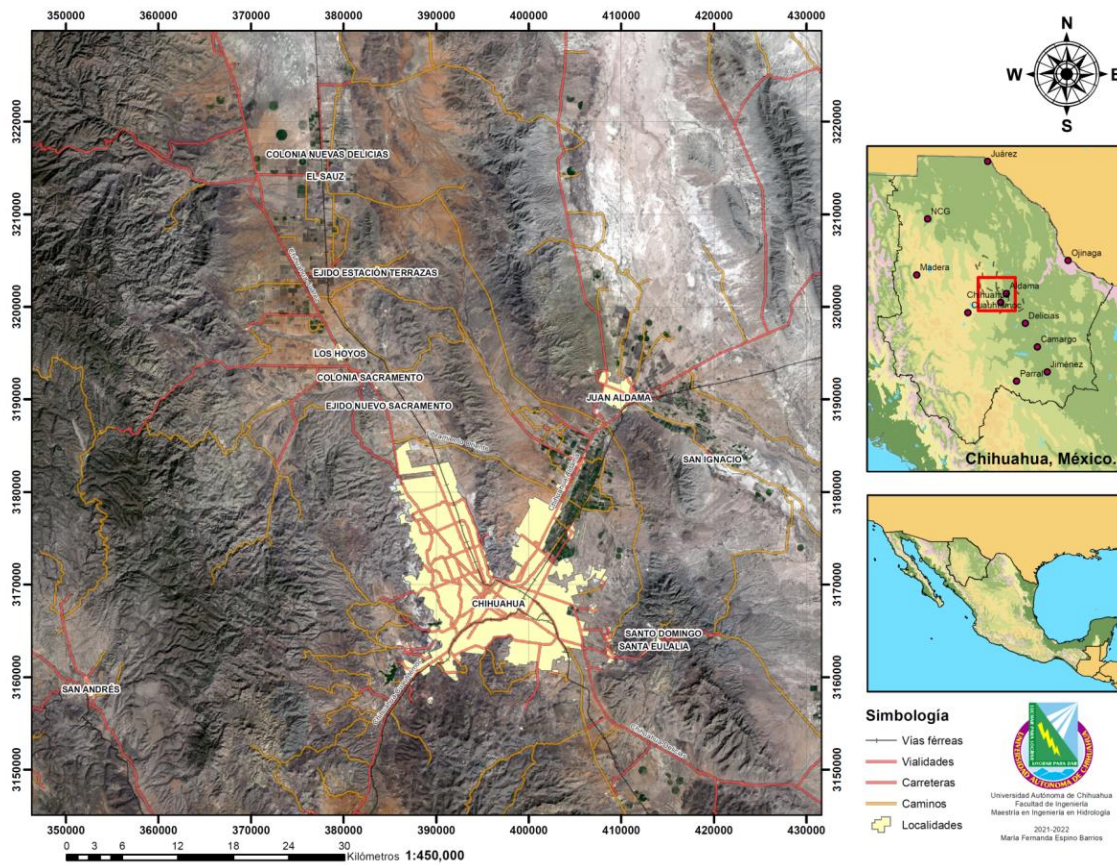


Figura 4. Localización del área de estudio. Imagen satelital obtenida del Servicio Geológico de Estados Unidos.

Las principales localidades que abarca la superficie de estudio son: Chihuahua, Juan Aldama, Ejido Nuevo Sacramento, Colonia Sacramento, Los Hoyos, Ejido Estación Terrazas, El Sauz y la Colonia Nuevas Delicias.



Las principales vías de comunicación en la región son las carreteras que comunican a la ciudad de Chihuahua con Cuauhtémoc, al suroeste; Juan Aldama, al noreste; Ciudad Juárez al noroeste y Delicias al sureste.

La zona de estudio pertenece a la Región Hidrológico-Administrativa Río Bravo y a las regiones hidrológicas Cuencas Cerradas del Norte y Bravo-Conchos. Las provincias fisiográficas de esta porción del país son las Sierras y Llanuras del Norte, con algunas fracciones pertenecientes a la Sierra Madre Occidental; y a las subprovincias Bolsón de Mapimí y Sierras y Llanuras Tarahumaras. Lo anterior fue determinado a partir de la información vectorial obtenida en la base de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

2.2 CLIMA

La información climatológica fue recolectada de la base de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), en forma de datos vectoriales. Dentro del área de estudio se identifican alrededor de nueve tipos de climas, que constituyen aproximadamente siete grupos, los cuales tienen la clasificación de Köppen, basada en la relación de la vegetación natural con el clima (Figura 5).

Domina un clima seco a semiseco con variaciones de semicálido a templado; en las regiones próximas a las serranías, al oeste de la zona, se presenta un clima subhúmedo (INEGI, 2008).

Según la clasificación de Köppen (modificación por E. García en 1998) los climas son: secos semicálidos [BS0hw(w)], secos templados [BS0kw y BS0kw(w)], semisecos semifríos [BS1k"w], semisecos templados [BS1kw y BS1kw(w)], muy secos semicálidos [BWhw(w)], semifríos subhúmedos [C(E)(w1)] y templados subhúmedos [C(w1)] (INEGI, 2008).

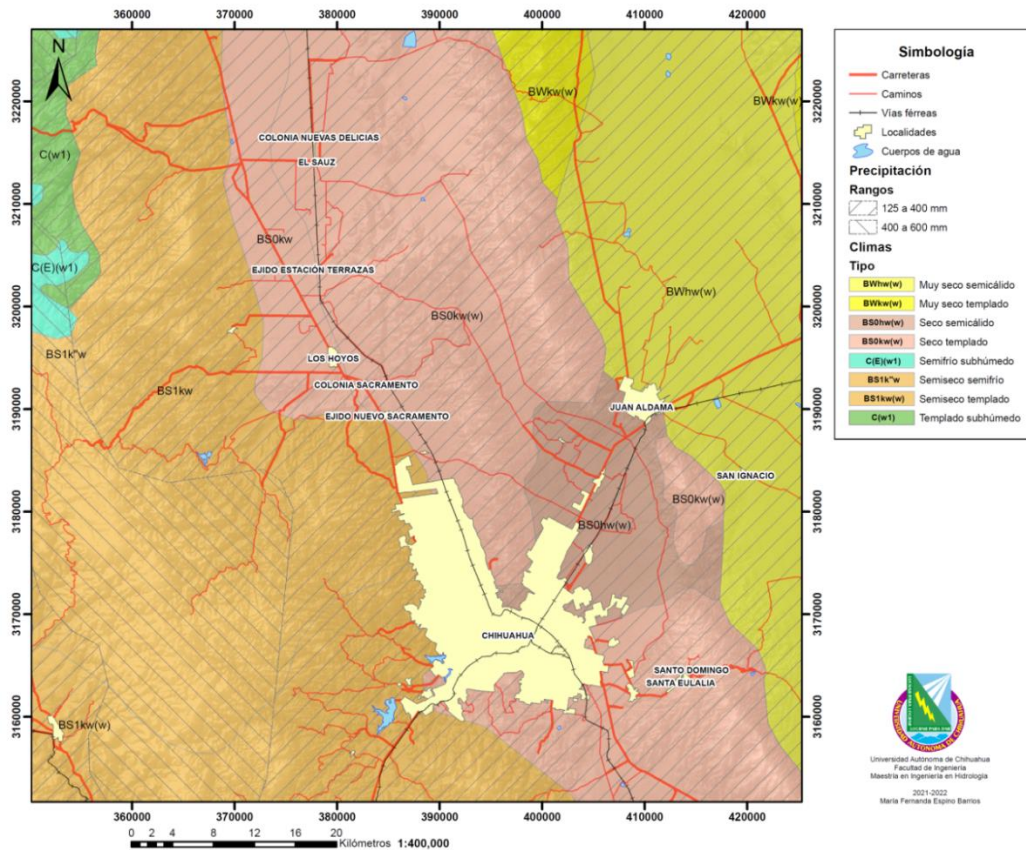


Figura 5. Distribución de los tipos de clima en el área de estudio.

- **Temperatura.** Las temperaturas medias anuales presentan un rango de 12 a 18 °C, incluso hasta los 22 °C. Las mayores temperaturas corresponden a los meses de mayo a agosto y las menores de diciembre a febrero. Las precipitaciones en esta zona son escasas y durante el verano (CONABIO, 1998).
- **Precipitación.** La media anual generalmente es de 125 a 400 mm, en la parte de valle o en zonas de elevaciones medias a bajas. Ésta incrementa en la parte montañosa del área de estudio, con una variación entre 400 a 600 mm (INEGI, 2008).

Ambos factores son fuertemente influenciados por la ubicación geográfica de Chihuahua; al estar dentro de la franja subtropical, las características más relevantes son los climas áridos y bajas precipitaciones.



2.3 TIPO DE SUELOS

El tipo de roca, el grado y tiempo de meteorización y erosión, además de procesos biológicos, son factores responsables de la generación de diferentes tipos de suelos, los cuales se diferencian según sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Figura 6).

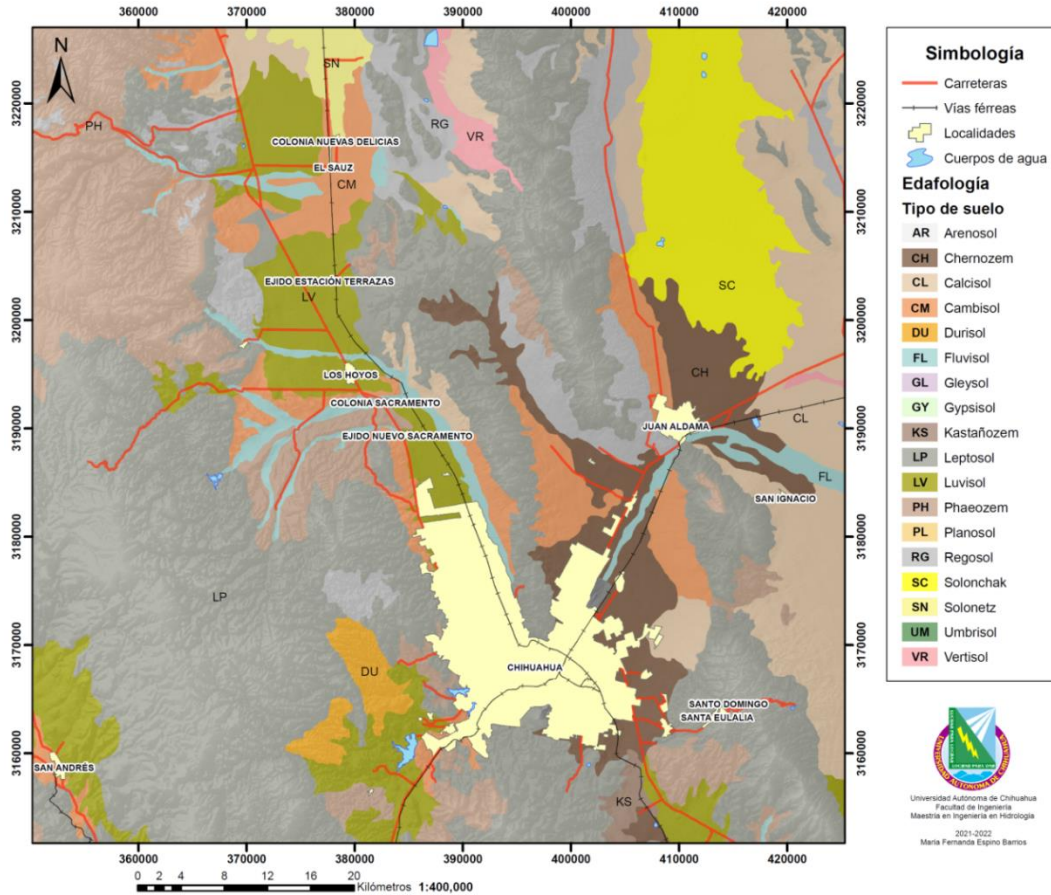


Figura 6. Distribución de los tipos de suelo en el área de estudio.

El suelo de tipo *chernozem* (CH) posee una capa gruesa superficial, de color negro indicando su riqueza en materia orgánica; proviene principalmente de sedimentos eólicos (FAO, 2008). El *calcisol* (CL) se considera una acumulación secundaria cuyo material parental es calcáreo, originado a partir de diversos depósitos (aluviales, coluviales y eólicos); presenta vegetación natural escasa (FAO, 2008).



Los del tipo *cambisol* (CM) son suelos jóvenes con una acumulación inicial de arcilla y meteorización del material parental (Raffino, 2020). Son de textura media a fina, provenientes de varias clases de rocas, con distribución en diferentes tipos de terrenos. Presentan decoloración e incremento porcentual de arcilla y/o sustracción de carbonatos (FAO, 2008).

Los *durisoles* (DU) se relacionan principalmente con los ambientes áridos y semiáridos, con uso limitado al pastoreo intensivo. Son suelos someros que contienen sílice secundaria. Originados de depósitos aluviales y coluviales (FAO, 2008).

Los *fluvisoles* (FL) son suelos jóvenes en depósitos aluviales, aunque también pueden desarrollarse en depósitos lacustres y marinos. Presentan estratificación de sedimentos recientes y la materia orgánica presente decrece irregularmente (FAO, 2008).

Los suelos de tipo *kastañozem* (KS) son similares a los del tipo *chernozem*, la diferencia es el espesor del horizonte rico en humus, que es menor en los del tipo KS, no tan oscuro y con acumulaciones superiores de carbonatos secundarios. Origen en material no consolidado (FAO, 2008).

Los *leptosoles* (LP) son suelos pedregosos, someros y poco desarrollados, principalmente en zonas montañosas de escasa vegetación (FAO, 2008). Los *luvisoles* (LV) poseen mayor contenido de arcilla a medida que aumenta el espesor, presentan diferenciación de arcilla (horizonte árgico) y provienen de materiales no consolidados (FAO, 2008).

Los *phaeozems* (PH) comparten características con los *chernozems* y *kastañozems*, pero los primeros presentan una lixiviación más intensa, proporcionando un horizonte rico en humus (FAO, 2008).

Los *regosoles* (RG) están poco desarrollados, con ausencia de grava y arenosos, con extensión en lugares áridos y semiáridos (FAO, 2008).



Otro tipo son los *solonchak* (SC) cuyas concentraciones de sales solubles son altas, característicos de zonas áridas y semiáridas, provenientes de materiales no consolidados. Dichas concentraciones dificultan el crecimiento de la vegetación (FAO, 2008).

Los *solonetz* (SN) son suelos arcillosos, densos y estructurados; contienen una alta proporción de sodio y magnesio (iones adsorbidos e intercambiables). Presenta una coloración parda a negra (FAO, 2008). Los *vertisoles* (VR) son suelos muy arcillosos que incluyen arcillas expansivas. Tienden a formar grietas profundas al secarse (FAO, 2008).

2.4 USO DE SUELO Y VEGETACIÓN

La agricultura de riego utiliza agua suplementaria para el desarrollo de los cultivos durante el ciclo agrícola, por ejemplo, bombeo desde la fuente de suministro (un pozo) o por gravedad (INEGI, 2009). Este tipo de agricultura varía según los ciclos vegetativos: anual (1 año), semipermanente (2 a 10 años) y permanente (mayor a 10 años) (INEGI, 2012).

La agricultura de temporal indica la dependencia del ciclo vegetativo hacia las lluvias, es decir, la cantidad de lluvia y la capacidad del suelo de retención de humedad (INEGI, 2009).

En los alrededores de la ciudad y proximidades de las serranías, se localiza el bosque de encino; encino-pino, relacionado con rocas de origen ígneo extrusivo félsico y en calizas; bosque de galería, que se desarrolla principalmente en márgenes de ríos y arroyos, cerca de las presas de la zona (INEGI, 2012). Los bosques de pino y pino-encino son más comunes en las cadenas montañosas donde la precipitación es mayor, en un ambiente primariamente ígneo (Figura 7) (INEGI, 2012).

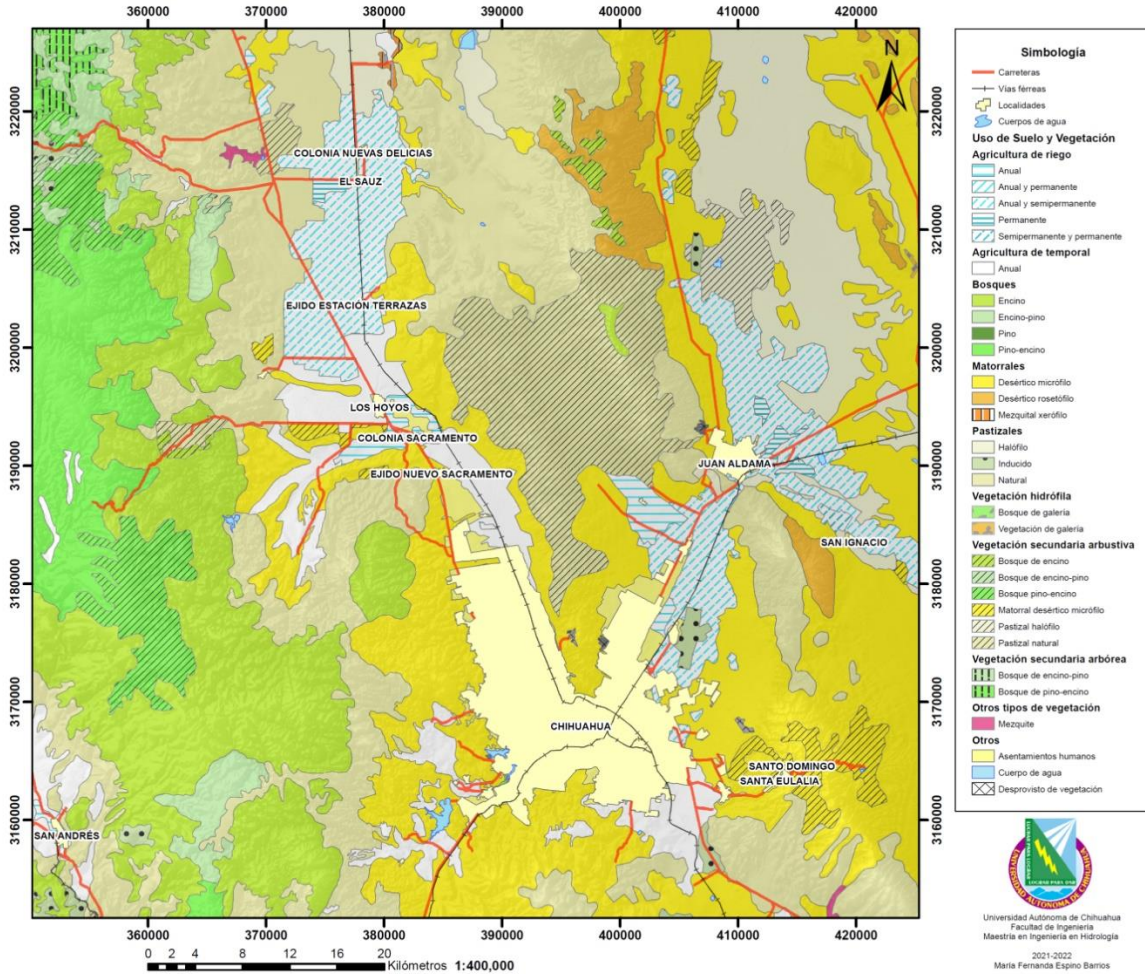


Figura 7. Distribución de los diferentes usos de suelo y vegetación en el área de estudio.

Existen áreas de matorrales desérticos tanto micrófilos como rosetófilos debido a su amplia distribución en zonas áridas y semiáridas. Los pastizales halófilos se desarrollan en suelos que tienden a ser salino-sódicos, con iones principales como cloruros y sulfatos, pH entre 7.0 y 8.5, con posibilidad de reacciones alcalinas en caso de ser dominante el carbonato (INEGI, 2012). También se presenta el pastizal inducido y el natural (gramíneas, graminoides, hierbas y arbustos), casi siempre en suelos de naturaleza ígnea (INEGI, 2012). La vegetación secundaria presente es arbustiva de bosque de encino, de bosque de encino-pino, pino-encino, de matorral desértico micrófilo, de pastizal halófilo y de pastizal natural (INEGI, 2009).

2.5 HIDROGRAFÍA

Con la información obtenida del Portal de Geoinformación de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), los estudios de disponibilidad de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se determinaron las siguientes características hidrográficas (Figura 8).

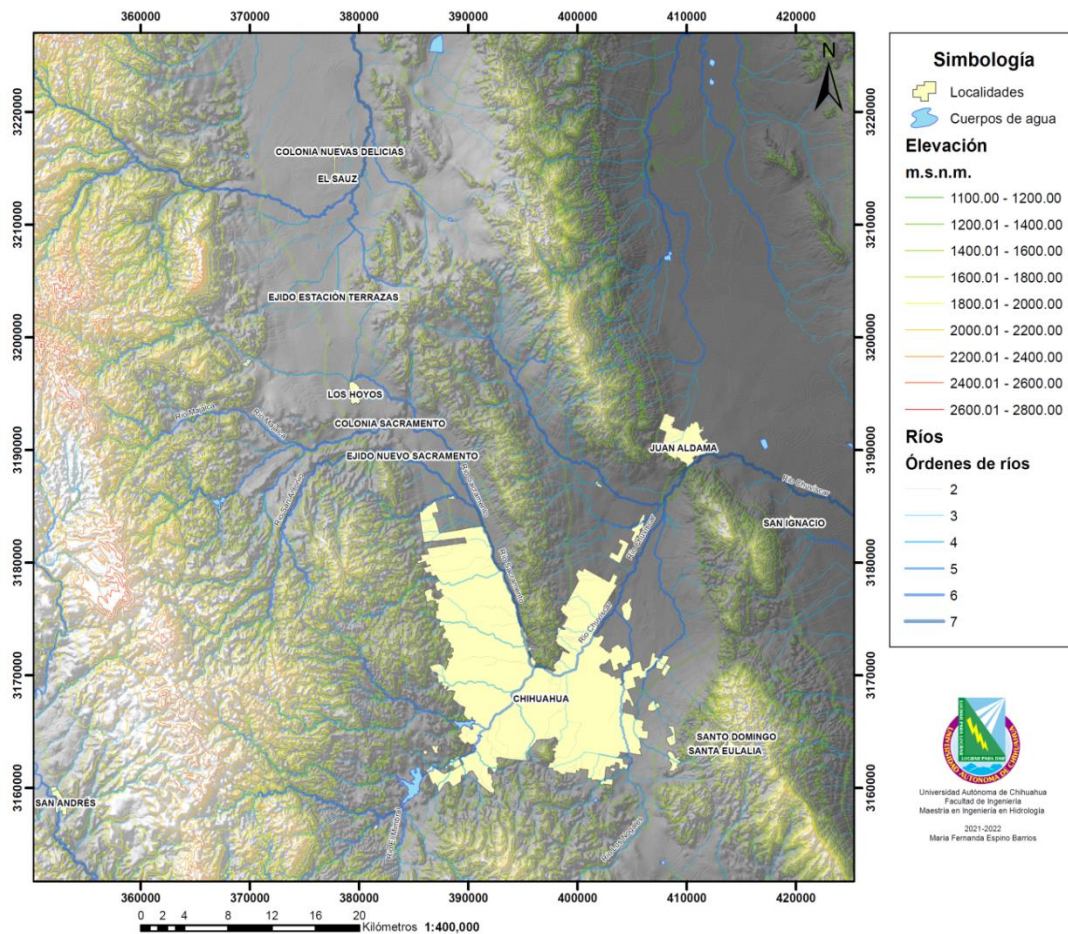


Figura 8. Hidrografía y topografía del área de estudio.

La zona de estudio abarca dos regiones hidrológicas: a) la de Cuencas Cerradas del Norte (Región 34) en la porción norte, donde el sistema orográfico permite la formación de



subcuencas del tipo lacustre aluvial; y b) la de río Bravo-Conchos (Región 24) en la porción sur, siendo ésta última la que cubre mayor parte del área (CONABIO, 2007).

Dentro de estas regiones se encuentran varias presas importantes: la presa San Marcos, presa Chuvíscar, presa El Rejón y la presa Chihuahua. Otro cuerpo de agua importante es la Laguna de Encinillas, considerada intermitente por algunos autores.

La corriente más importante es el río Chuvíscar con los arroyos El Mimbral y Los Nogales como principales afluentes; su flujo tiende al noreste, atravesando Sierra Azul y la ciudad de Chihuahua. El río Sacramento nace al noroeste de la ciudad y descarga en la presa San Marcos; posteriormente, continúa hasta la localidad de Sacramento donde su dirección de flujo cambia hacia el sureste. Ambas corrientes principales convergen y se mantienen hasta llegar a Juan Aldama. A partir de este punto su dirección varía al sureste, donde finalmente se unen al río Conchos.

2.6 PROVINCIAS Y SUBPROVINCIAS FISIográfICAS

Provincias fisiográficas

La Sierra Madre Occidental (SMO) es una provincia de edad cenozoica que se extiende desde la frontera con los Estados Unidos de América hasta la Faja Volcánica Transmexicana, con una longitud de aproximadamente 1200 km y de 200 a 400 km de ancho; se caracteriza por ser una provincia volcánica dominada por rocas ígneas producto de diferentes episodios magmáticos (Ferrari *et al.*, 2005).

La geología de esta provincia forma conjuntos de rocas ígneas, tanto intrusivas como extrusivas, de diferentes episodios que mantienen relación con la orogenia Laramide (subducción de la placa Farallón por debajo de la placa de Norteamérica). Se han determinado cinco conjuntos de mayor relevancia (Ferrari *et al.*, 2005). El *primero* consta de rocas intrusivas y extrusivas del Cretácico Superior y Paleoceno. El *segundo*, rocas volcánicas, principalmente de composición andesítica y algunas de composición dacítica-riolítica del Eoceno. El *tercero*, ignimbritas (sic) silíceas emplazadas durante el Oligoceno

y Mioceno tempranos. El *cuarto*, coladas basáltico-andesíticas posteriores a cada emplazamiento ignimbrítico. Por último, coladas de basaltos e ignimbritas (sic) durante el Mioceno tardío, Plioceno y Cuaternario (Ferrari *et al.*, 2005).

Los primeros dos conjuntos se definen como el Complejo Volcánico Inferior (CVI) y el tercero como el Supergrupo Volcánico Superior (Mcdowell & Keizer, 1977). El cuarto conjunto se definió como una extensión del cinturón de “Basalto-Andesitas del Sur de la Cordillera” (*SCORBA*, por sus siglas en inglés), formado por cuatro grandes provincias basálticas del Cenozoico, presentes en la parte oeste de Norteamérica (Cameron *et al.*, 1989). El último se ha relacionado con episodios de extensión que se relacionan con la apertura del Golfo de California, producto del *Basin and Range* (Henry & Aranda-Gómez, 2000). La Figura 9 presenta un esquema hidrogeológico representativo de la Sierra Madre Occidental.

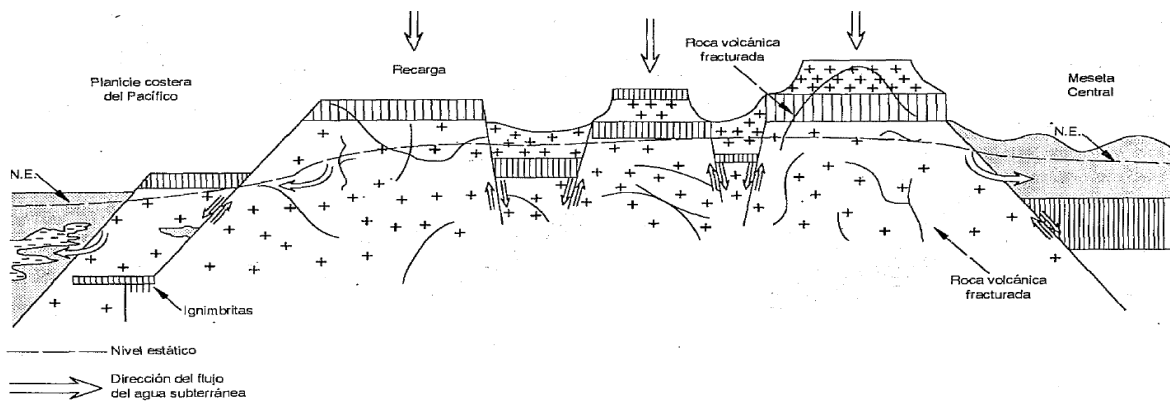


Figura 9. Sección hidrogeológica esquemática de la Provincia Sierra Madre Occidental (Velázquez-Aguirre & Ordaz-Ayala, 1992).

La provincia fisiográfica de Sierras y Llanuras del Norte representa la parte norte de la altiplanicie mexicana. Se extiende desde el noroeste del estado de Chihuahua, que corresponde a la parte suroeste de Estados Unidos de América, hasta las cercanías de Nazas en Durango y la Laguna, al suroeste de Coahuila. En ésta provincia son frecuentes las cuencas endorreicas o “*bolsones*” (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático,

2021). Se caracteriza por su fisiografía de sierras y cuencas; el clima en esta región se considera árido a semiárido, con temperaturas que varían entre 14°C y 18°C (Velázquez-Aguirre & Ordaz-Ayala, 1992).

La provincia presenta una orientación NW-SSE, abarcando parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Coahuila y Durango. Su origen se relaciona con el plegamiento de secuencias marinas del Mesozoico, relleno de fosas tectónicas y derrames lávicos, dando paso a la formación de cuencas endorreicas (Figura 10) (INEGI, 2003). Las principales rocas son ígneas, cerca de la SMO y las rocas de edad cenozoica rellenan las cuencas; también incluye rocas metamórficas y sedimentaria de diferentes edades (Velázquez-Aguirre & Ordaz-Ayala, 1992).

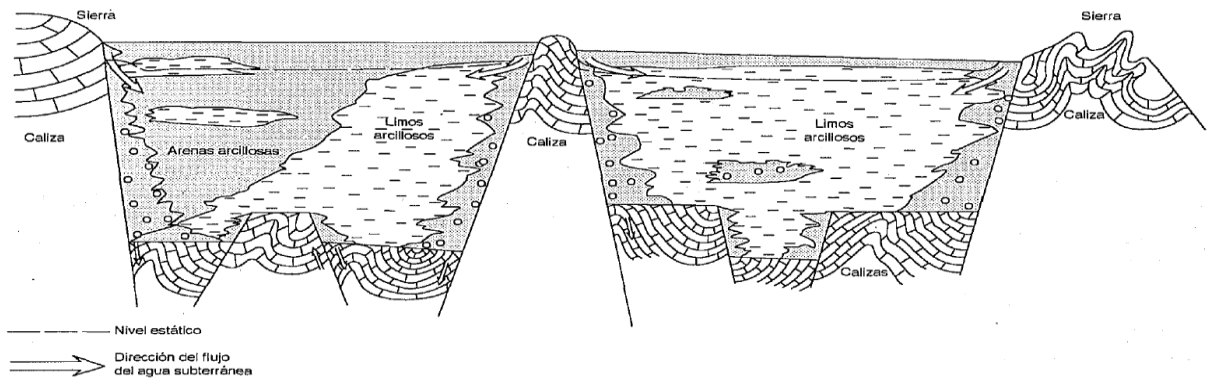


Figura 10. Sección hidrogeológica esquemática de la Provincia Cuencas aluviales del Norte (Velázquez-Aguirre & Ordaz-Ayala, 1992).

Subprovincias fisiográficas

La subprovincia del Bolsón de Mapimí colinda con la subprovincia de Llanuras y Médanos del Norte hacia el sur, al costado oriente de la SMO (Figura 11). Dentro de esta subprovincia se encuentran diversas sierras estructuralmente definidas NW-SE y de oeste a este. Las rocas que afloran en esta zona son rocas carbonatadas de edad cretácica, que

corresponden a los anticlinales; además de rocas extrusivas terciarias¹ y cuaternarias (Villalobos-Aragón, 2004). Dominan llanuras aluviales y bajadas, con presencia de sierras escarpadas y plegadas, y lomeríos. Los lomeríos al norte mantienen relación con rocas extrusivas félsicas y presentan fallas normales; al sur, están relacionadas con calizas. Es una región plana a 1,200 m.s.n.m. (INEGI, 2003).

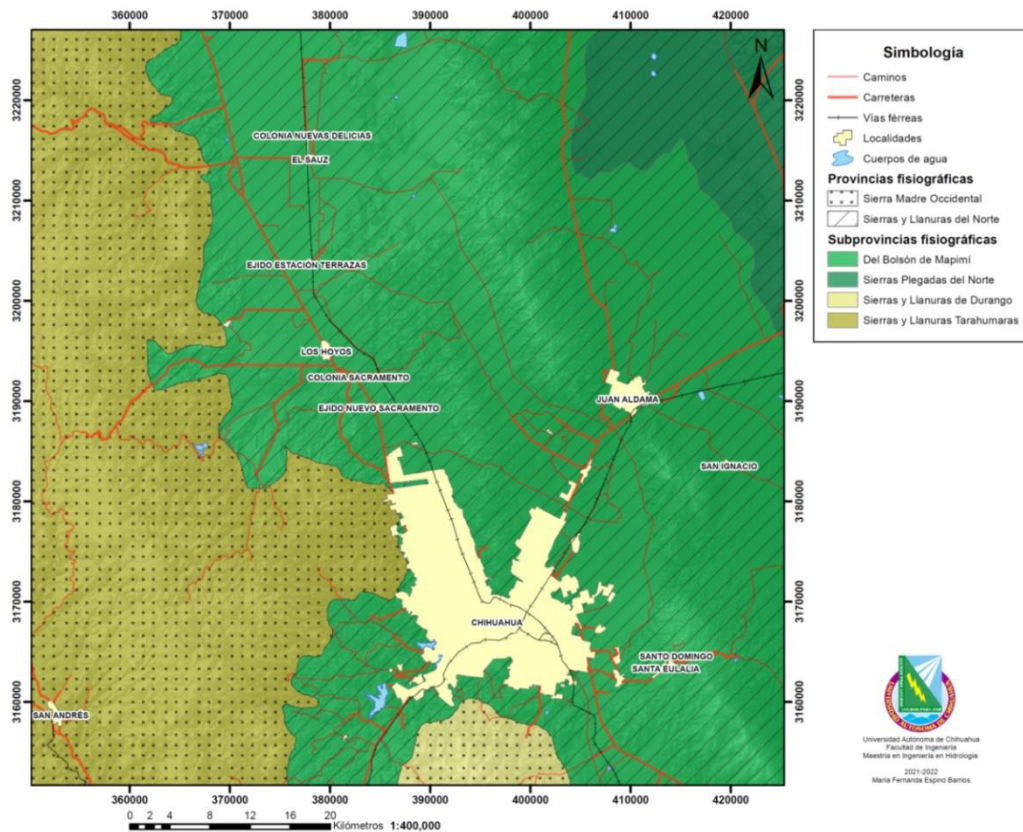


Figura 11. Provincias y subprovincias en el área de estudio.

La subprovincia de Sierras y Llanuras Tarahumaras se encuentra en la parte centro-oeste del estado de Chihuahua, ocupando poco más del 10% del territorio estatal. Consta de tres grupos de sierras con orientación cercana a N-S; la primera es la sierra Tarahumara, luego las sierras La Montosa-Las Tunas-El Rosal y, por último, la sierra El Nido. Las dos

¹ NOTA: El *Terciario* abarca los periodos del Paleógeno y Neógeno. El término y sus variantes se encuentran actualmente en desuso. Sin embargo, forma parte de la nomenclatura aplicada por el Servicio Geológico Mexicano, así como por algunos autores, por lo que se empleará a lo largo del documento.



primeras se clasifican como sierras y la última como meseta. Estos grupos de serranías están separados por valles y llanuras (INEGI, 2003).

2.7 FISIOGRAFÍA Y GEOMORFOLOGÍA

A escala regional existen varios cambios de elevaciones topográficas, siendo las principales las sierras y cuencas, resultado del *Basin and Range*, que como su nombre lo indica son un conjunto de zonas de serranías que están separadas por cuencas o valles, que se interpretan como depresiones alargadas. Las sierras tienen un rumbo preferencial NW-SE. Los procesos que desencadenaron la formación del relieve regional son descritos en el apartado de Tectónica y geología estructural.

Dentro del área de estudio y a sus alrededores se encuentran topoformas de bajada, identificadas como elevaciones medias a bajas; y llanuras, que tienden a ser extensas. También se encuentran lomeríos, que son colinas o lomas de elevaciones variables. Las mesetas son un tipo de relieve caracterizado por su elevación y su carácter plano en la cima (Figura 12).

Cercano a la ciudad de Chihuahua el paisaje está constituido por llanuras de desagüe endorreico, denominadas por los antiguos exploradores españoles como “*bolsones*”, compuestos de materiales clásticos que se interdigitan con derrames lávicos. Estos valles tectónicos se encuentran ubicados entre sierras con longitudes variables que pueden incluso superar 150 kilómetros. Estas formaciones se consideran como bloques de falla, cuyas pendientes son pronunciadas y, en ocasiones, muy abruptas. Su ancho no suele superar los 15 kilómetros y se componen principalmente de rocas sedimentarias mesozoicas, recubiertas por derrames volcánicos y material piroclástico (Reyes-Cortés, 2004).

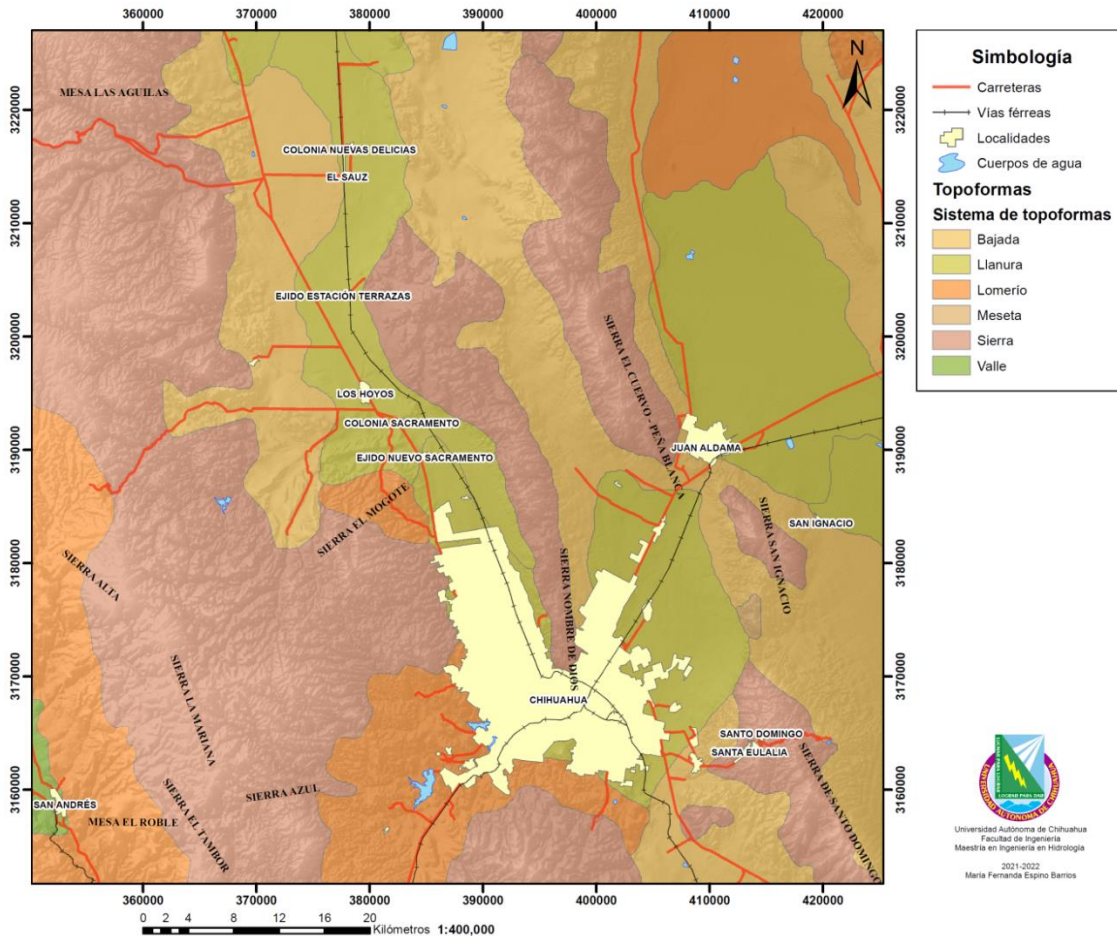


Figura 12. Sistemas de topoformas que se encuentran en el área de estudio.

Hacia la porción este de la zona de estudio se encuentra la sierra Nombre de Dios, de topografía montañosa irregular y abrupta, constituida especialmente por rocas volcánicas y sedimentarias (Reyes-Cortés, 2004). La elevación máxima alcanza poco más de los 1850 m.s.n.m., una anchura de cuatro kilómetros y una longitud próxima a los 25 kilómetros. Esta serranía tiene una dirección preferencial NNW-SSE y un basculamiento hacia el NE, debido al fallamiento por tectónica de edad laramídica (Reyes-Cortés, 2004).

Regionalmente, otra de las principales sierras es Peña Blanca, famosa por sus yacimientos uraníferos en rocas ígneas. Ésta se localiza al norte de la sierra Nombre de Dios. Sierra Peña Blanca posee una orientación N-S, con elevaciones máximas superiores a los 2,050 m.s.n.m. y una longitud de aproximadamente 70 kilómetros. Constituida por



diferentes tipos de roca que representan lomeríos hacia la parte baja de la sierra, aunque hacia algunas porciones se presentan bordes acantilados; con un drenaje denso de tipo dendrítico (Mercado-Reyes, 1977). La sierra El Cuervo se encuentra al noroeste de Juan Aldama, con elevaciones de poco menos de 2,150 m.s.n.m. El drenaje en esta porción es del tipo dendrítico-paralelo con presencia en rocas volcánicas y sedimentarias (CONAGUA, 2020d).

La sierra El Nido se localiza al oeste del área de estudio, en una zona de transición entre la provincia de la Sierra Madre Occidental y Sierras y Cuencas, denominada como Subsección Babícora-Bustillos. La porción de Cumbres de Majalca se encuentra en el borde oriental de dicha subsección, con una altitud que varía entre los 2,100 y 2,300 m.s.n.m. Su característica más sobresaliente es un relieve muy accidentado, integrada por secuencias de rocas volcánicas de diversas clasificaciones (SEMARNAT, 2016).

Hacia el Bloque Calera-El Nido, se desarrolla un drenaje de tipo dendrítico sobre las rocas volcánicas. Por otro lado, las secuencias ignimbríticas se encuentran bajo un marcado control estructural dando origen a una tendencia al desarrollo paralelo (NW-SE) (Villalobos-Aragón, 2004 y referencias).

Al suroeste de la ciudad de Chihuahua, se destaca Sierra Azul, sector en el que se localizan los Ojos del Chuvíscar. Las elevaciones alcanzan los 2,400 m.s.n.m. Compuesta principalmente de rocas ígneas extrusivas, con afloramientos de rocas de tipo calcáreo, sobre las cuales se muestra un drenaje de tipo subparalelo a dendrítico (Araiza-Pérez & Grajeda-Carrera, 1987).



Capítulo 3: Contexto geológico

3.1 GEOLOGÍA

La zona de estudio se caracteriza por la presencia de rocas sedimentarias cretácicas y rocas ígneas terciarias que conforman las serranías, así como material granular que rellena las fosas tectónicas.

3.1.1 Estratigrafía

La estratigrafía fue determinada y adaptada a partir de las Cartas Geológico-mineras del Servicio Geológico Mexicano (Tabla 4):

Tabla 4. Especificaciones de Cartas Geológico-mineras.

Escala 1:50,000			Escala 1:250,000		
Clave	Nombre	Año de publicación	Clave	Nombre	Año de publicación
H13-C46	El Sauz	2009	H13-7	Buenaventura	1998
H13-C56	Sacramento	2006	H13-8	Ojinaga	2003
H13-C66	Chihuahua	2002	H13-10	Chihuahua	1997
H13-C67	Aquiles Serdán	2006	H13-11	Ciudad Delicias	2000
H13-C57	Juan Aldama	2022			
H13-C58	Trancas	2020			

Precámbrico

- **Los Filtros** (Mesoproterozoico – Edad Grenvilleana)

Es un complejo metamórfico que incluye rocas tales como cuarcitas, metagranitos y anfibolitas. Se localiza en las inmediaciones de la sierra El Cuervo, cerca del rancho de Los Filtros. Los gneises anfibolíticos presentan la característica textura bandeada (anfíboles y plagioclasas), además de sericita, clorita y epidota (SGM & FIFOMI, 2006).

Se reporta un afloramiento de mármol cerca de un metagranito constituido principalmente de microclina, cuarzo, ortoclasa y plagioclasa. Dicho protolito fue intrusionado por diques de roca de composición máfica. Las anfibolitas forman un conjunto



de diques que atraviesan las rocas metasedimentarias y los metagranitos. Su mineralogía está compuesta principalmente por hornblenda, plagioclasa, magnetita y, en menor medida, granate (SGM & FIFOMI, 2006).

Paleozoico

- **Formación Rara (Plomosas) (Pérmico)**

Es una secuencia de metalutitas y metareniscas que presentan plegamiento, con facies de pumpellita-prehnita; está cubierta discordantemente por la Formación Las Vigas.

Las areniscas y lutitas tienen diferentes coloraciones y son, en su mayoría, de granulometría fina. El espesor de los estratos es variable (de estratos finos a masivos), así como la presencia de factores como concreciones calcáreas, nódulos de caliza y calizas negras lenticulares (Ramírez & Acevedo, 1957). Llamada Formación Plomosas por algunos autores. La Figura 13 es una fotografía panorámica de la Formación Rara.



Figura 13. Panorámica de la Formación Rara, localidad Los Filtros (SGM & FIFOMI, 2006).



Cretácico Inferior

- **Formación Las Vigas** (Valanginiano-Hauteriviano)

Se compone principalmente de grandes espesores de areniscas, lutitas y limolitas, resultado de ambientes continentales durante la fase de regresión en la cuenca de Chihuahua. Su depósito cubrió discordantemente la secuencia de la Formación Rara. Sus sedimentos clásticos y calcáreos subyacen a la Formación Cuchillo. Las Vigas afloran en diferentes sierras del estado de Chihuahua, con variaciones en espesor (100 a 382 m). Al SW de la ciudad de Chihuahua afloran areniscas rojizas de grano grueso; mientras que al NE del Rancho de Sacramento se presentan calizas negras cubriendo areniscas grises rojizas, de grano medio, sin fósiles (Ramírez & Acevedo, 1957). Otro de los afloramientos se sitúa en la localidad de Cuchillo Parado (Figura 14).



Figura 14. Formación Las Vigas, localidad Cuchillo Parado. Foto: Fernanda Espino, 2017.



- **Formación La Virgen** (Barremiano – Aptiano)

Es roca caliza fosilífera de estratificación media y yeso. Durante una reactivación de la transgresión se formó una laguna evaporítica, propiciando el depósito de yesos y sedimentos de esta formación. Se ha definido como una secuencia de yeso granular gris a café amarillento, anhidrita, lutita en menor proporción y caliza fosilífera de color gris (amarillento por intemperismo); aflora principalmente en la parte centro-este del estado de Coahuila; donde la localidad tipo es el Potrero de La Virgen en la sierra de las Ovejas (SGM, 2009f).

Los espesores reportados en diferentes estudios establecen un rango de 500 a 1,935 metros. Las rocas de esta formación se distribuyen ampliamente en los estados de Coahuila y Chihuahua. Su ambiente de depósito se ha establecido como de cuenca semicerrada, lagunar, plataforma somera o de *sabkha*² al oeste de la Península de Coahuila, permitiendo la formación de carbonatos y evaporitas (SGM, 2009f).

- **Formación Cupido** (Hauteriviano-Aptiano)

Durante el Aptiano se depositaron concordantemente sedimentos de plataforma, con escaso aporte de terrígenos y están representados por calizas fosilíferas y lutitas. La localidad tipo fue descrita al norte del cañón El Mimbres, al sureste de Parras, Coahuila. Se describe una secuencia de calizas gris oscuro con presencia de concreciones de pirita, pedernal y marcasitas oxidadas, con algunas intercalaciones de limolitas violetas y brechas sinsedimentarias (Monier-Castillo & Lopez-Palomino, 2011). Contiene abundante material fósil y se identificaron tres facies: de plataforma (*wackestone* y *packstone* dolomitizadas); de cuenca (*mudstone*, estilolitos, pedernal y pirita); y marginal (arrecifes, bancos de rudistas y corales). Las variaciones de espesores se encuentran en un rango de 50 a 885 metros en diferentes sierras de Coahuila, Chihuahua, Zacatecas, Tamaulipas, Nuevo León, San Luis Potosí y Durango (Monier-Castillo & Lopez-Palomino, 2011).

² Depósito sedimentario de alta salinidad.



- **Formación La Peña** (Aptiano)

Consiste en una secuencia de sedimentos arcillosos y calcáreos, y de lutita con intercalaciones de caliza, que sobreyace de manera transicional a la Formación La Virgen. Ésta se divide en dos partes: la inferior se conforma de calizas de capas de espesor medio a grueso; en la parte superior se encuentran calizas, lutitas y limolitas de estratificación delgadas fácilmente erosionables. Los espesores varían desde los 90 a los 700 metros dependiendo de la localidad. Se ha correlacionado con la Formación Cuchillo en Chihuahua y la Formación Las Uvas en Coahuila (González-Arroyo & Salas-Vázquez, 1996).

- **Formación Tamaulipas Superior** (Albiano)

Durante los cambios de facies, se depositó una secuencia de calizas de grano fino en estratos delgados, de coloraciones crema y gris, con un aumento en contenido arcilloso hacia la cima. Se observan intercalaciones de margas y lutitas negras (Camacho-Angulo, 1987). La localidad tipo fue designada al cañón de La Borrega, en Tamaulipas. Su ambiente de depósito es de origen marino, de facies infraneríticas, de mar abierto con aguas profundas; se asocia con facies de cuenca, de plataforma externa o ambiente nerítico profundo (SGM, 2013). Se ha descrito una base de poco más de 76 metros, sobre ésta se encuentran de 90 a 100 metros de caliza gris oscuro; después, alrededor de 9 metros de caliza blanca cremosa y pedernal blanco. Además se han descrito alternancias delgadas de calizas arcillosas, margas laminares y lutitas, de 10 a 40 centímetros. La secuencia total cuenta con espesores de 60 a 400 metros (SGM, 2013).

- **Formación Aurora** (Albiano)

Está constituida por caliza masiva en estratos gruesos y presenta tanto nódulos como bandas de pedernal. Debe su nombre a la Mina Aurora, en la sierra Cuchillo Parado, Chihuahua. Entre las diferentes áreas donde la formación aflora, sus espesores varían de 40 a 1,500 metros. Su origen se establece como facies de plataforma somera (SGM, 2004). Diversas descripciones la han clasificado como caliza de tipo *wackestone-packstone* y *grainstone*, en estratos de finos a masivos, de coloración gris a ocre; incluye intercalaciones



de lutita calcárea gris (SGM, 2004). A través de su contenido paleontológico y sus diferentes relaciones a nivel estratigráfico se le ha determinado una edad del Albiano inferior al superior. Se distribuye principalmente hacia la parte media de la Cuenca de Chihuahua, con extensión hacia la Sierra Madre Oriental y la Cuenca de Sabinas (SGM, 2004).

- **Formación Walnut** (Albiano)

Sobreyace concordantemente a la Formación Tamaulipas Superior. Consiste en estratificación delgada de caliza-lutita. Son arcillas amarillentas y calizas laminadas. La localidad tipo es Walnut Springs, Condado de Bosque, Texas. Su espesor varía de 1 a casi 350 metros en los distintos afloramientos (Ramírez & Acevedo, 1957). Sobreyace la Formación Glen Rose y se correlaciona con la Formación Walnut de la sierra El Burro en Coahuila y la Formación Walnut de Texas. Su origen se da en las facies neríticas (presencia de margas y calizas margosas) y facies arrecifales que se desarrollaron en Chihuahua (rudistas y corales) (Ramírez & Acevedo, 1957).

- **Formación Edwards** (Albiano)

Es una secuencia de calizas arrecifales y rocas asociadas. Su localidad tipo está en Barton Creek, cerca de Austin, Texas. Se han descrito calizas duras en bancos grises gruesos con espesores de hasta 1,000 metros según el afloramiento (Ramírez & Acevedo, 1957). En otros estudios se han determinado diferentes partes que componen esta secuencia, hacia la base se encuentra la caliza arrecifal y estratos más arenosos; la parte media es caliza no arrecifal con nódulos de pedernal y la parte superior está compuesta de caliza arrecifal con bandas de pedernal. Algunos estratos muestran diferente granulometría (SGM, 2006b). Su origen es de facies neríticas con depósitos de tipo arrecifal (rudistas presentes) (Ramírez & Acevedo, 1957). Se considera el equivalente a la parte superior de la Formación Aurora y Tamaulipas Superior, con su origen en facies de plataforma interna en aguas someras (SGM, 2006b).



- **Formación Finlay** (Albiano)

La localidad tipo de esta formación es la caliza Finlay que se localiza en las montañas Finlay, en Texas. Consiste en una secuencia de calizas ubicadas al sur de la sierra Peña Blanca. Estas calizas son de tonalidades grisáceas, de estratificación delgada a masiva, que localmente presentan nódulos y bandas finas de pedernal. Presenta intercalaciones con estratos delgados de caliza de carácter arcilloso y de lutita arenosa. Otra característica que resalta son las fracturas rellenas de calcita y cuarzo autigénico, y estilolitas (SGM, 2009e). Los espesores de la unidad varían entre los 12 y 350 metros. Se distribuye en varios puntos de Chihuahua. Su origen se considera intramareal a submareal, aunque algunos estudios señalan ambientes someros con alta energía o en etapa regresiva (SGM, 2009e).

- **Formación Benevides** (Albiano)

Secuencia que sobreyace de manera concordante a la Formación Finlay y que consiste en lutitas fosilíferas con intercalaciones de caliza. La localidad tipo de esta formación se documentó cerca del Rancho Benevides (SGM, 2009d). En promedio, esta formación tiene un espesor de 38 a 46 metros, sin embargo, se estima un rango de 20 a 900 metros. El ambiente se considera como de depósitos neríticos y arrecifes locales, resultado de la acumulación hídrica con buena oxigenación y baja tasa de sedimentación (Monreal & Longoria, 1999). La formación se extiende desde el oeste de Texas hacia el noreste de la ciudad de Chihuahua, en las inmediaciones de la sierra El Morrión, aunque en otros estudios también se han identificado afloramientos en las sierras El Bronce, Boquilla, Cuchillo Parado, San Carlos y Santa Elena. La formación se describió en el área de El Cuervo como lutita y caliza nodular. Presenta contenido fósil (Monreal & Longoria, 1999).

- **Formación Loma de Plata (Georgetown)** (Albiano)

Consiste en una caliza gruesa que es cubierta discordantemente a su vez por conglomerado oligomictico, de origen continental de clastos calcáreos. La localidad tipo se encuentra en Pinto Canyon en el condado de Presidio, Texas. Ha sido descrita como una



unidad de caliza nodular en la base y caliza estratificada en la parte superior. Su textura deposicional corresponde al tipo *mudstone*, presenta un color gris claro a pardo; la estratificación es de delgada a gruesa y presenta vetillas de calcita y siderita (SGM, 2009b). Posee fósiles silicificados, nódulos y bandas de pedernal, comunes en facies de arrecifes masivos. El espesor de esta formación se encuentra en un rango de 100 a 500 metros. En cuanto a su depósito, se considera que se llevó a cabo en un ambiente nerítico sobre arrecifes, en carbonatos de aguas someras que permitió el desarrollo de biohermas y lagunas rudistas (Monreal & Longoria, 1999). Es llamada Formación Georgetown por algunos autores.

Cretácico Superior

- **Formación Del Río** (Cenomaniano)

La localidad tipo se encuentra en la Loma de la Cruz, al sur de Del Río, Texas. Los afloramientos en el estado de Chihuahua son esporádicos. En el área del Carrizo la formación consiste en arcillas de color amarillento con estratos delgados de areniscas calcáreas amarillas. En la sierra El Morrión (Figura 15), al este de Aldama, está formada por lutitas grises-amarillentas, mientras que hacia Placer de Guadalupe se conforma por lutitas grises oscuras que se vuelven arenosas hacia la cima. Cerca del Rancho de Hormigas, al NNW de Aldama, el afloramiento consta de lutitas amarillentas, de bajo carácter calcáreo, subyaciendo calizas (Ramírez & Acevedo, 1957).

Presenta un cambio litológico de calizas masivas; aflora de manera escasa y en arroyos. Sobreyace de manera concordante sobre la Formación Georgetown (Chihuahua) y subyace la Formación Buda. Por su cantidad de fósiles como ostreas, turrítelas y globigerinas, y su cantidad de arcilla, se indica que su origen se dio en un medio nerítico o epicontinental (Ramírez & Acevedo, 1957).



Figura 15. Sierra El Morrión, Aldama. Foto: Fernanda Espino, 2017.

- **Formación Buda** (Cenomaniano)

La localidad tipo de esta unidad se localiza al centro y suroeste de Texas. Se compone de calizas en estratos masivos que tienen espesores de entre 60 cm y 30 metros, el color es de amarillento a blanco y gris, inclusive de tonalidades naranjas y rosadas. Presenta vetillas de calcita y gran cantidad de hierro. Se clasifica como *mudstone* y *wackestone* arcillosos, presenta restos silicificados de microorganismos y nódulos ferruginosos (SGM, 2009a). Posee gran variedad de grupos fósiles. Según la documentación de los sedimentos, éstos muestran que su depósito se llevó a cabo en facies neríticas o bien de plataforma estable con influencia de mar abierto. También se ha documentado un ambiente carbonatado de agua somera (SGM, 2009a).

- **Grupo Cañón Majalca** (Cretácico Superior)

La zona está integrada por una secuencia de rocas volcánicas y volcanoclásticas de gran espesor; su composición varía desde riolítica hasta basáltica. Los tipos de material presentes son ignimbritas (sic), lavas, aglomerados, brechas, lapilli y conglomerados. Todos éstos se distribuyen ampliamente en toda la zona. El rango de edad varía desde el Cretácico Superior hasta el Mioceno superior y Plioceno inferior (SEMARNAT, 2016).



La descripción realizada por Spruill en 1976 determinó que las rocas más antiguas presentes son las andesitas y las ignimbritas (sic), considerándose como Unidad Majalca correspondiente al Grupo Volcánico Inferior de la Sierra Madre Occidental (SEMARNAT, 2016).

La definición realizada por Mauger en 1979 señala el nombre de “Grupo Volcánico del Cañón de Majalca”, donde se describe que las secuencias ignimbríticas se encuentran desvitrificadas y hematizadas; existen derrames andesíticos de entre 5 y 10 metros de espesor, rocas volcanoclásticas y tobas. Algunas estructuras presentes son los domos riolíticos con estructuras verticales. El material volcanoclástico se distribuye como horizontes o lentes acuñaos (Reyes-Cortés, 2005).

- **Grupo Peñas Azules** (Cretácico Superior)

El Grupo Peñas Azules, también llamado Unidad Peñas Azules, es una secuencia de derrames en conjunto con material piroclástico, cuya composición es andesítica-basáltica; además presenta alternancia con gravas y conglomerados. En un estudio realizado por Reyes-Cortés (2005) se dividió la secuencia en el miembro inferior, con un espesor de cerca de 500 metros, donde las rocas presentes (conglomerados y brechas volcanoclásticas) forman estructuras de abanico aluvial; y la parte superior se compone de toba gris, con tonalidades blancas a rosadas, con derrames andesíticos y basálticos grises con bandas rojizas hacia la cima. Mantiene un contacto discordante angular con el Grupo Volcánico del Cañón de Majalca. Su ambiente de depósito es considerado como continental de derrame y como aluvial (Reyes-Cortés, 2005).

- **Formación Pozos (Sacramento)** (Maastrichtiano)

También conocida como conglomerado Pozos, aflora en la porción centro-este de la sierra Peña Blanca. El conglomerado cuenta con clastos de caliza redondeados con mala clasificación; y en menor medida, fragmentos de roca volcánica. La matriz se clasifica como arenosa-calcárea. Puede tener buena consolidación o bien formar bandas grises (Badilla-Cruz & Aponte-Barrera, 1989). Marca el cambio entre las rocas del Mesozoico



(calcáreo-arcillosas) y del Cenozoico (volcánicas), constituyendo la base de la secuencia terciaria en el distrito uranífero (CONAGUA, 2020c).

Paleógeno

Paleoceno

Serie de intrusivos de composición diorítica, granodiorítica, monzonítica y una serie de sills y diques. Estos mismos cuerpos intrusivos afectaron las secuencias sedimentarias anteriores. Surge un evento volcánico de origen dómico de composición félsica, al igual que la extrusión de lavas andesíticas de origen fisural. Así mismo, se depositaron rocas piroclásticas, andesíticas y brechas andesíticas que sobreyacen de manera discordante a las unidades sedimentarias del Cretácico (SGM, 2006a).

Las riolitas en las partes bajas de la sierra Nombre de Dios, cerros Chino y El Venado, presentan pliegues de flujo, alteración, textura afanítica y fracturamiento con alteración epitermal. Cubren discordantemente al conglomerado Sacramento (nombre informal de depósitos de conglomerado oligomítico del Cretácico) y son cubiertas a su vez por andesitas (CONAGUA, 2020d). La sierra Nombre de Dios está constituida en su mayoría por rocas andesíticas y riolíticas (CONAGUA, 2020a).

Sobre el eje del anticlinal Sierra Azul, al suroeste de la ciudad de Chihuahua, aflora un intrusivo diorítico, afectando las formaciones de Las Vigas y La Virgen (SGM, 2002). Los intrusivos cuarzo-monzoníticos que afloran cerca de la entrada de Cumbres de Majalca y el emplazamiento de un pórfido riolítico en Estación Terrazas, ocasionó el desarrollo de metamorfismo de contacto en las calizas de la zona. Otros pórfidos riolíticos se localizan hacia el sur de la sierra Nombre de Dios (CONAGUA, 2020a).



Eoceno

- **Formación Loma del Toro**

Está compuesta por tobas riolíticas, que se distribuyen en la zona minera de Cusihuriachi (CONAGUA, 2020b), además de presentarse derrames andesíticos (Padilla-Palma *et al.*, 1997).

- **Unidad La Trampa**

Aflora en la región de Majalca, en la mesa La Trampa y al este de Cumbres de Majalca. La unidad presenta un espesor de más de 100 metros de basaltos, brechas y sedimentos tobáceos-lacustres. Sobreyace discordantemente sobre tobas riolíticas (Padilla-Palma *et al.*, 1997).

- **Unidad Sepúlveda**

A finales del Eoceno se depositaron los derrames riolíticos de la Unidad Sepúlveda (Padilla-Palma *et al.*, 1997). Se iniciaron emisiones riolíticas, domos resurgentes y derrames dacíticos; diferentes eventos dómicos riolíticos continuaron en el Oligoceno (SGM, 2006a). En las sierras Nombre de Dios (centro y sur), El Mogote y el cerro Jesús María se presentan tobas riolíticas de coloración café y tonalidades amarillentas a oscuras. Sobreyacen andesitas y subyacen rocas riolíticas. Son cubiertas por depósitos del Holoceno de forma discordante (CONAGUA, 2020d).

Oligoceno

- **Unidad Minas**

La Unidad Minas está formada por dacitas que afloran en forma de derrames (Padilla-Palma *et al.*, 1997).

- **Formación Tomochic**

Se conforma de rocas sedimentarias y volcánicas. Se observan conglomerados gruesos, rocas fluviales y lacustres. De manera interestratificada, hay cenizas, flujos de ceniza y tobas. También es posible encontrar lavas silíceas intercaladas con tobas y



derrames. Además existe intercalación entre riolita, tobas y flujos. Sobre las tobas descansan lavas andesíticas y una unidad conglomerática (SGM, 2010).

- **Unidad Ojo Blanco**

Las andesitas de la Unidad Ojo Blanco fueron estudiadas por Kempter en 1986; éstas se distribuyen al oeste y suroeste en las localidades de Tomochic, Tajirachi y Cohaguachic. Subyacen discordantemente a basaltos en la sierra El Tambor (Padilla-Palma *et al.*, 1997).

Se presentan derrames de riolita bajo control estructural (fallas normales), además de domos basálticos (SGM, 2009c). A finales de esta época los eventos volcánicos regionales llegan a su fin luego de la emisión de lavas andesíticas y basálticas (SGM, 2006a). Como resultado de eventos volcánicos se depositaron discordantemente secuencias de tobas riolíticas, con intercalaciones de secuencias ignimbríticas, sedimentos volcanoclásticos, basaltos, brechas basálticas, brechas riolíticas y tobas riolíticas. Esta secuencia es afectada por domos riolíticos. Afloran intrusivos de composición granítica y granodiorítica. Así mismo, afloran pórfidos riolíticos y latíticos (CONAGUA, 2020d; SGM, 2002).

Neógeno

Mioceno

Debido a los procesos erosivos que iniciaron durante esta época, se depositaron materiales clásticos de origen continental conformando conglomerados polimícticos. Los basaltos y andesitas sobreyacen de manera discordante hacia el sureste (SGM, 2002).

Cuaternario

Holoceno

Como resultado de los procesos de erosión se encuentran depósitos de limos-arenas, conglomerados polimícticos y aluvión, en zonas de elevaciones bajas (SGM, 2002). Los



conglomerados polimícticos se distribuyen en las sierras Santo Domingo, El Cuervo (Figura 16) y Nombre de Dios, y presentan alternancia de gravas y arenas de poca consolidación (CONAGUA, 2020d).

Se componen en mayor medida por fragmentos líticos de caliza, y en menor medida por rocas volcánicas (sierras Santo Domingo y El Cuervo). En la sierra Nombre de Dios es mayor la cantidad de clastos volcánicos que sobreyacen discordantemente sobre la Formación Finlay y secuencias volcánicas del Eoceno, son cubiertos concordantemente por limos y arenas (CONAGUA, 2020d).



Figura 16. Sierra El Cuervo. Foto: Fernanda Espino, 2017.

A partir de la revisión y evaluación de la columna geológica de las distintas cartas de las que se obtuvo la información, se realizó la integración de éstas, con la finalidad de obtener una columna litoestratigráfica representativa de la zona de estudio, la cual se muestra en la Figura 17.

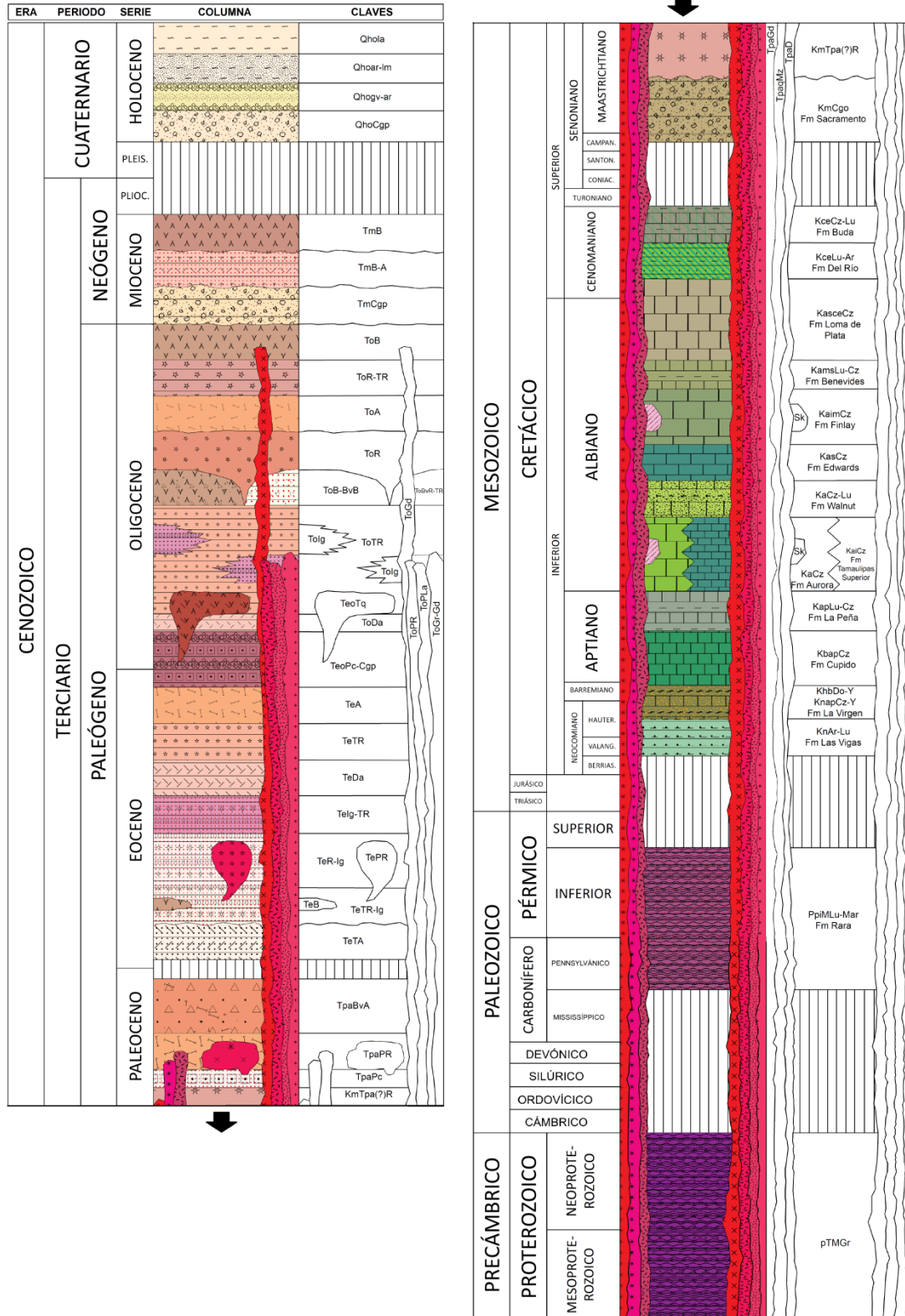


Figura 17. Columna litoestratigráfica tipo para la zona central del estado de Chihuahua. Simbología del Servicio Geológico Mexicano.



3.1.2 Tectónica y geología estructural

A nivel regional se han registrado diferentes ciclos tectónicos, identificándose tres elementos principales: el Cratón de Norteamérica en el norte y los Cinturones Orogénicos Ouachita y el Cordillerano (Consejo de Recursos Minerales, 1994):

(A) El basamento Precámbrico en la zona es una prolongación meridional del Cratón de Norteamérica en los estados de Sonora y Chihuahua, la cual incluye tres cinturones de intensa deformación y metamorfismo: Greenville (900-1100 Ma); Mazatzal (1600-1700 Ma) y Yapauai (1700-1800 Ma); sólo el primero ha sido identificado en Chihuahua (Consejo de Recursos Minerales, 1994).

(B) El Cinturón orogénico Ouachita es un sector de la gran cadena Apalachiana y es consecuencia de los procesos de colisión que dieron origen a la soldadura de Pangea. Sus efectos incluyen fallamiento en bloques (Consejo de Recursos Minerales, 1994).

(C) El Cinturón Orogénico Cordillerano es un sistema asociado a la evolución de la Provincia Pacífica de Norteamérica; este sistema puede ser dividido en siete episodios:

C1. Tafrogenia Palizada (Triásico Superior – Jurásico Medio): episodio distensivo relacionado con la formación del Golfo de México. Su actividad estuvo presente al este del estado, pero su intensidad y distribución de estructuras son desconocidas (Consejo de Recursos Minerales, 1994).

C2. Tectónica de Transcurrencia (Jurásico). Algunos elementos paleotectónicos y su distribución han sido explicados por modelos de una o más fallas con desplazamiento lateral, entre ellos el de Megacizalla Mojave-Sonora, que ocasionó un desplazamiento a todo lo ancho del estado de Chihuahua (Consejo de Recursos Minerales, 1994).

C3. Fase Orogénica Nevadiana (Jurásico Superior). El arco magmático del Jurásico en Sonora y Sinaloa sufrió deformación y metamorfismo debido a un episodio orogénico finijurásico (Consejo de Recursos Minerales, 1994).

C4. Fase Orogénica Mesocretácica (Orogeniana). Episodio de compresión que deformó el arco vulcano-sedimentario del Cretácico Inferior en el transcurso del Albiano-



Cenomaniano y provocó el ascenso del territorio serrano (Consejo de Recursos Minerales, 1994).

C5. Fase Orogénica Laramide (Cretácico Superior-Terciario Inferior). Esta fase representa la culminación del ciclo orogénico Cordillerano. Fue el episodio compresional unilateral y uniforme más profundo y extendido, cuyo actividad inició hace 80 Ma y finalizó hace 45 Ma, con estructuras alternadas (anticlinales y sinclinales) dirigidas al NW; caracterizada por un intenso magmatismo y la construcción del Cinturón Tectónico del Oriente de Chihuahua (Consejo de Recursos Minerales, 1994).

C6. Episodio Volcánico del Terciario Medio. Se presentó la emisión de la Serie Volcánica Superior, en una etapa de relativa tranquilidad tectónica, representando una etapa de transición entre el régimen compresivo y el distensivo (Consejo de Recursos Minerales, 1994).

C7. Episodio Extensional de Sierras y Cuencas (Terciario Superior). Último régimen tectónico, se presentó el cese de la convergencia de placas al noroeste del país. Se caracterizó por un levantamiento regional y la formación de un gran número de fallas normales que definieron sucesiones de sierras y cuencas tectónicas (Figura 18). Las fallas tienden a ser paralelas a los ejes de plegamiento laramídico (orientación NW-SE y N-S) (Consejo de Recursos Minerales, 1994).

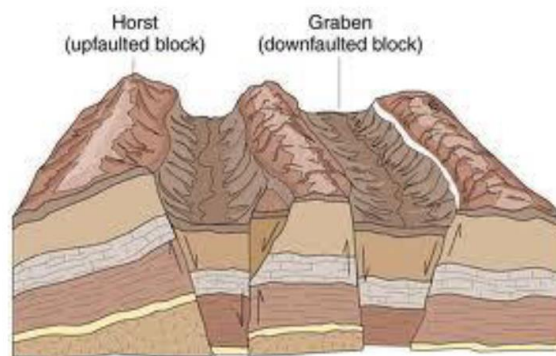


Figura 18. Representación gráfica de fosas tectónicas (Departamento de Geociencias de la Universidad de Wisconsin-Madison, 2021).



3.1.3 Geología del subsuelo

El basamento se ha indicado como parte del Cratón de Norteamérica, compuesto de rocas ígneas y metamórficas, algunas de ellas de edad Grenvilliana o precámbrica correspondientes a la Formación Los Filtros; y la Formación Rara (Pérmico) constituida por metalutitas y metarenisca; ambas localizadas hacia la porción centro-nororiental de Chihuahua, en la sierra El Cuervo (Ferrari *et al.*, 2005).

La Cuenca de Chihuahua es una cuenca *pull-apart* (lateral derecha) que comenzó su formación en el Oxfordiano, durante un periodo de rotación relativa de la placa Norteamericana (Haenggi, 2001). Se establecen tres ciclos sedimentarios, el primero perteneciente al Jurásico Superior – Aptiano, donde se depositaron terrígenos y carbonatos; el segundo fueron depósitos carbonatados con intercalaciones arcillosas, correspondientes al Albiano-Cenomaniano; y por último, el depósito de sedimentos en su mayoría terrígenos, del Turoniano-Senoniano³. La tasa de sedimentación durante el Titoniano y Neocomiano⁴, superó la tasa de subsidencia tectónica lo que resultó en un extensivo depósito de material sedimentario (SGM & FIFOMI, 2006).

Al final del Cretácico Inferior inició una transgresión y el cese del fallamiento en los márgenes de la cuenca, permitiendo una secuencia constituida principalmente por carbonatos y aportes clásticos marinos (Haenggi, 2001; SGM & FIFOMI, 2006).

Durante el Albiano-Cenomaniano se depositaron secuencias principalmente de carbonatos con intercalaciones arcillo-calcáreas. Como parte de este ciclo se encuentran las formaciones Aurora, Tamaulipas Superior, Walnut, Edwards, Finlay y Benevides. Los depósitos de carácter terrígeno se presentaron hacia el Cretácico Superior, siendo las formaciones Loma de Plata, Del Río y Buda las que conforman esta etapa (SGM & FIFOMI, 2006).

³ Piso que engloba un intervalo del Coniaciano al Maastrichtiano (Cretácico Superior).

⁴ Parte inferior del Cretácico.



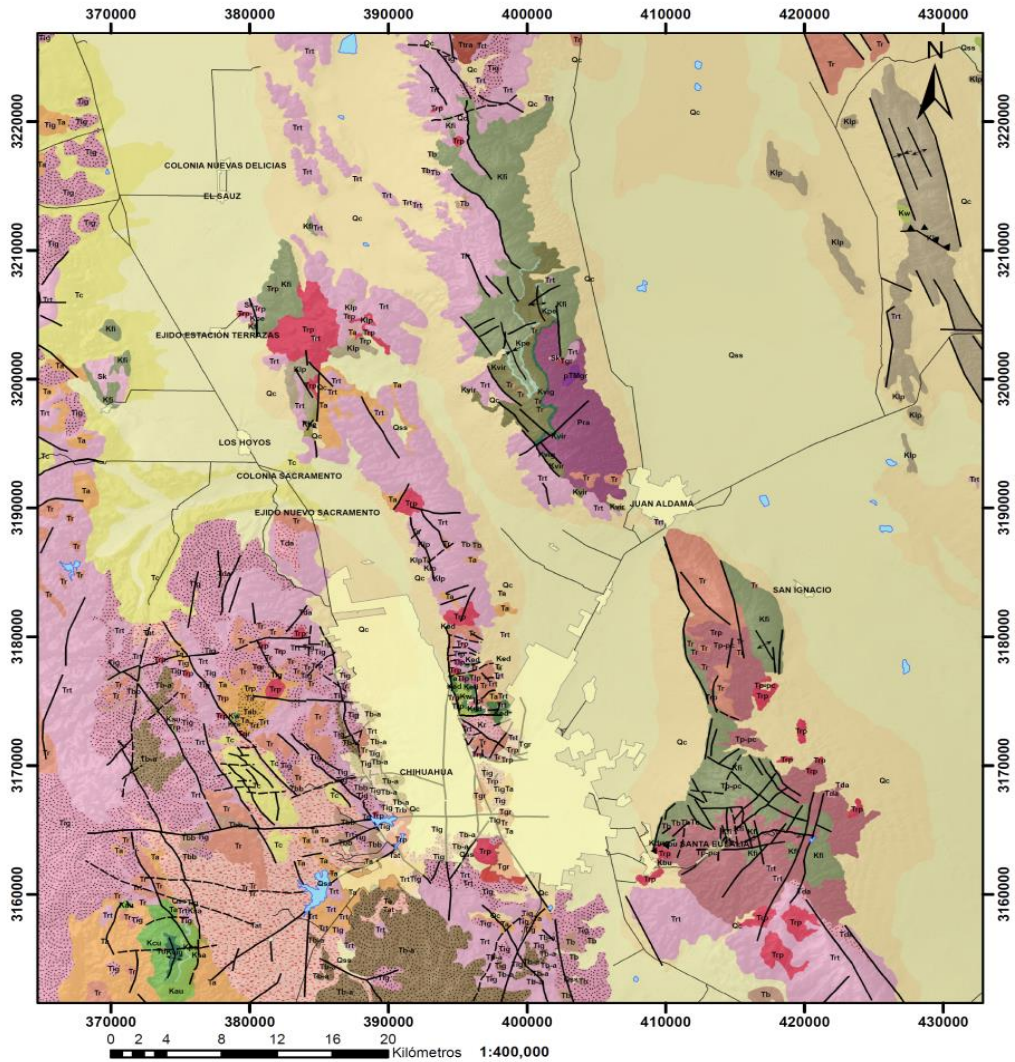
La orogenia Laramide (Cretácico Superior) fue el resultado de una tectónica compresiva que formó estructuras alteradas de sinclinales y anticlinales con orientación NW-SE. Durante el final del Cretácico y principio del Paleógeno se presentó el magmatismo de arco “Laramide”, contemporáneo a la deformación laramídica. Como resultado de esta actividad se obtuvieron rocas intrusivas y extrusivas, denominadas “Complejo Volcánico Inferior”. Dicho grupo o complejo incluye batolitos de diferentes composiciones, así como secuencias volcánicas andesíticas, tobas, riolitas y dacitas (Ferrari *et al.*, 2005). La Sierra Madre Occidental (Cretácico-Cenozoico) es el producto de diferentes episodios, tanto magmáticos como tectónicos, relacionados a la subducción de la placa Farallón. Posteriormente, luego de un magmatismo intermitente, se presentó el volcanismo del Eoceno (ignimbritas (sic) y coladas intermedias a silíceas) que está relacionado con el Supergrupo Volcánico Superior (SVS). El SVS se compone de secuencias ignimbríticas del Oligoceno-Mioceno, intercaladas con derrames de composición dacítica, riolítica y basáltica (Ferrari *et al.*, 2005).

En el régimen tectónico conocido como *Basin and Range* (Oligoceno) se dio un periodo de distensión que ocasionó fallas normales que definieron sierras y cuencas tectónicas (Ferrari *et al.*, 2005).

Durante el Cuaternario, a través de procesos erosivos del material ya existente, se generaron los sedimentos que rellenan las cuencas resultantes del *Basin and Range*.

En la Figura 19 se muestra la geología regional de la zona, a partir de la información de las cartas de escala 1:50,000 y 1:250,000, descritas en la Tabla 4.

La litología y estructuras resultantes de los procesos sedimentarios, ígneos, compresivos y distensivos se representan en las siguientes secciones geológicas. Dichas secciones se realizaron a partir de información de cortes litológicos de los pozos de la Junta Central de Agua y Saneamiento y la Comisión Nacional del Agua; de secciones geofísicas y de las Cartas Geológico-mineras del Servicio Geológico Mexicano.



Simbología

Unidades geológicas	
Cuaternario	
Qss	Arenas-limos
Qc	Conglomerado
Terciario	
Tb	Basalto
Tba	Basalto-andesita
Tc	Conglomerado polimictico
Tr	Riolita
Tbb	Brecha basáltica
Trh	Brecha riolítica
Tig	Ignimbrita
Trt	Toba riolítica
Ttra	Traquita
Tp-pc	Piroclastos-conglomerado
Ta	Andesita
Tda	Dacita
Tat	Toba andesítica
Tab	Brecha andesítica
Tpi	Piroclastos
Cretácico	
Kr	Riolita
Ksa	Fm. Sacramento
Kbu	Fm. Buda
Kdr	Fm. Del Rio
Klp	Fm. Loma de Plata
Kbe	Fm. Benevides
Kfl	Fm. Finlay
Ked	Fm. Edwards
Kw	Fm. Walnut
Kau	Fm. Aurora
Kts	Fm. Tamaulipas Superior
Kpe	Fm. La Peña
Kcu	Fm. Cupido
Kvir	Fm. La Virgen
Kvig	Fm. Las Vigas
Pérmico	
Pra	Fm. Rara
Precámbrico	
Mt	Metagranito
Intrusivos	
Tgr	Granito
Trp	Pórfido riolítico
Tlp	Pórfido latítico
Td	Diorita
Metamorfismo de contacto	
Sk	Skarn

Estructuras	
Tipo	
—	Falla normal
- - -	Falla lateral
▲▲▲	Falla inversa
+	Anticlinal
+	Sinclinal

	Cuerpos de agua
	Localidades
	Carreteras



Figura 19. Geología regional del área de estudio.



Los cortes se encuentran en un rango de 250 a 500 metros de profundidad, por lo que los contactos de rocas a mayor profundidad, o en áreas donde no se posee este tipo de información, son una interpretación de los datos del SGM. La localización de las secciones geológicas y geofísicas se muestra en la Figura 20 y la Figura 21.

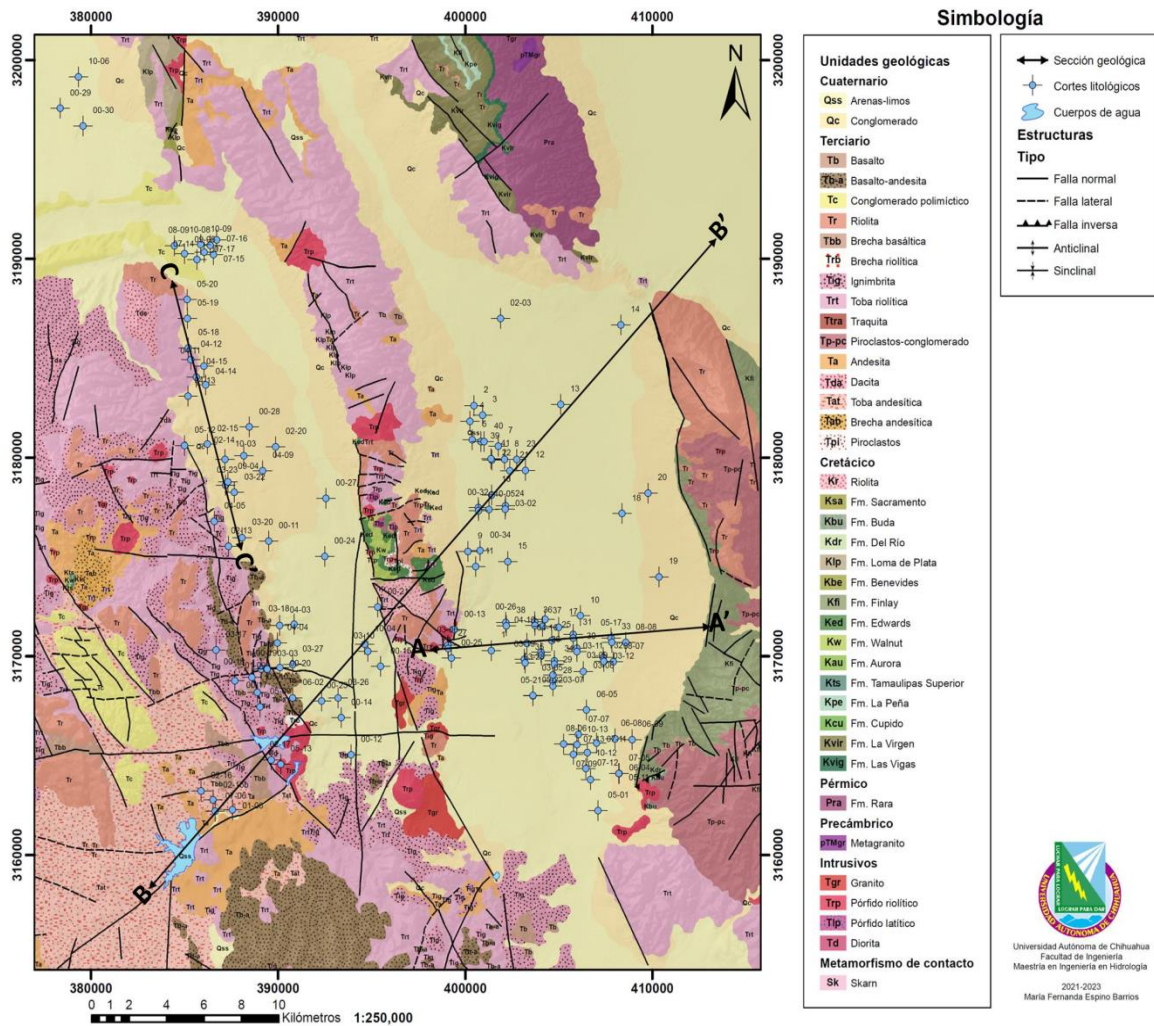


Figura 20. Localización de los cortes litológicos de la JCAS- CNA y secciones geológicas.

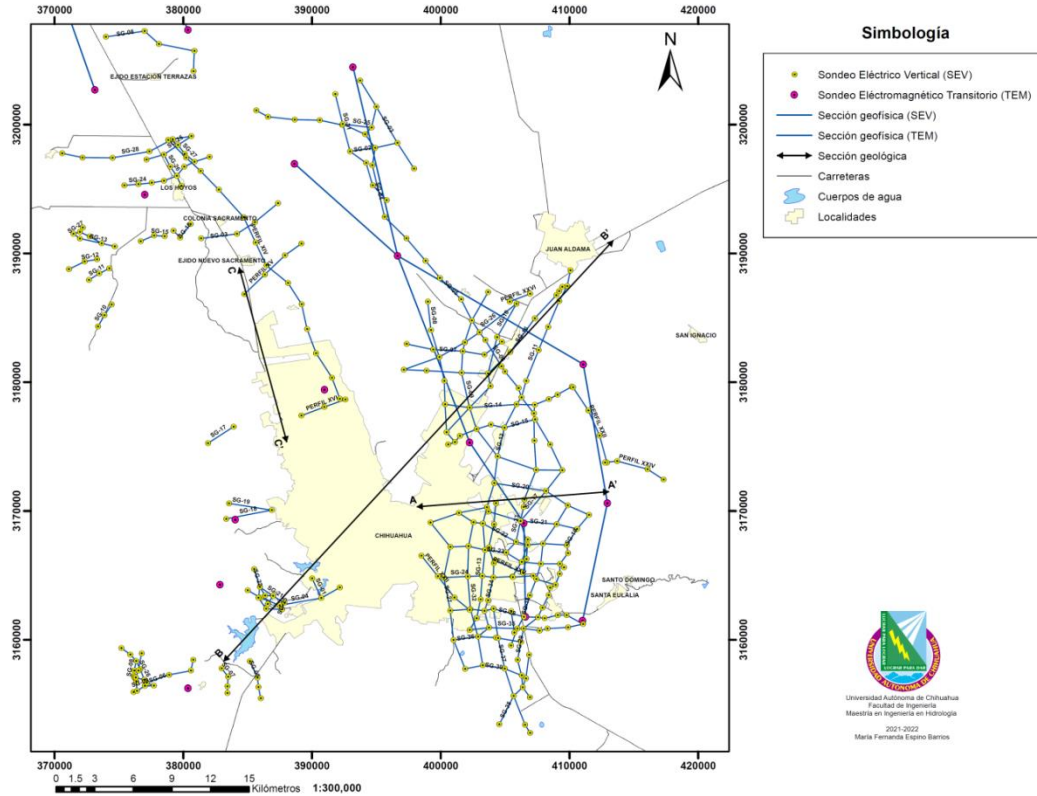


Figura 21. Localización de las secciones geofísicas de estudios previos de la JCAS.

La sección geológica A-A' (Figura 22) se localiza en la porción centro-oriental de la zona de estudio, entre la sierra Nombre de Dios y las sierras San Ignacio y Santo Domingo (Distrito minero Santa Eulalia). Tiene una longitud de 16 km y se realizó con la información de ocho pozos de JCAS y CNA.

Desde el punto de vista estructural, se presentan fallas normales que delimitan la cuenca (sistema de sierras y cuencas) en la que se encuentra. La base de la sección se conforma de rocas sedimentarias de edad cretácica, las cuales presentan deformación por plegamiento. Sobre éstas se posicionan secuencias de rocas volcánicas de diversa composición (félsica a intermedia), principalmente del Terciario. Una porción de la sierra Nombre de Dios es intrusionada por un pórfido riolítico. Como material de relleno de la cuenca existen conglomerados y arenas-limos, mismo que alcanza un espesor de hasta 500 metros en la parte central.

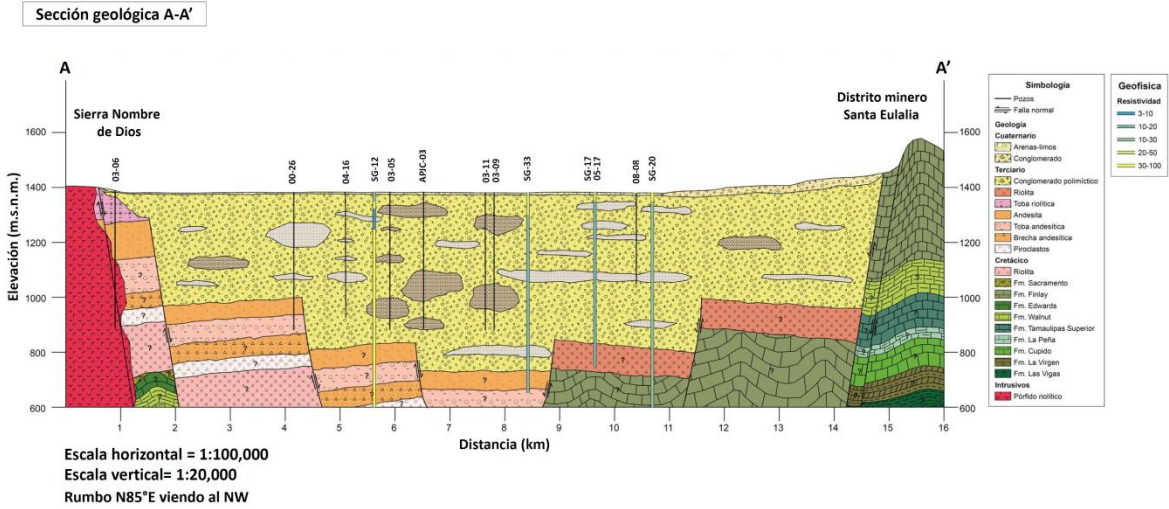


Figura 22. Sección geológica A-A' con información geofísica de la JCAS.

La sección geológica B-B' (Figura 23) inicia en la parte suroeste de la ciudad de Chihuahua hasta llegar a Aldama, con una extensión de 45 km. Se observa el sistema de *grabens* delimitados por las respectivas fallas normales con orientación NW-SE.

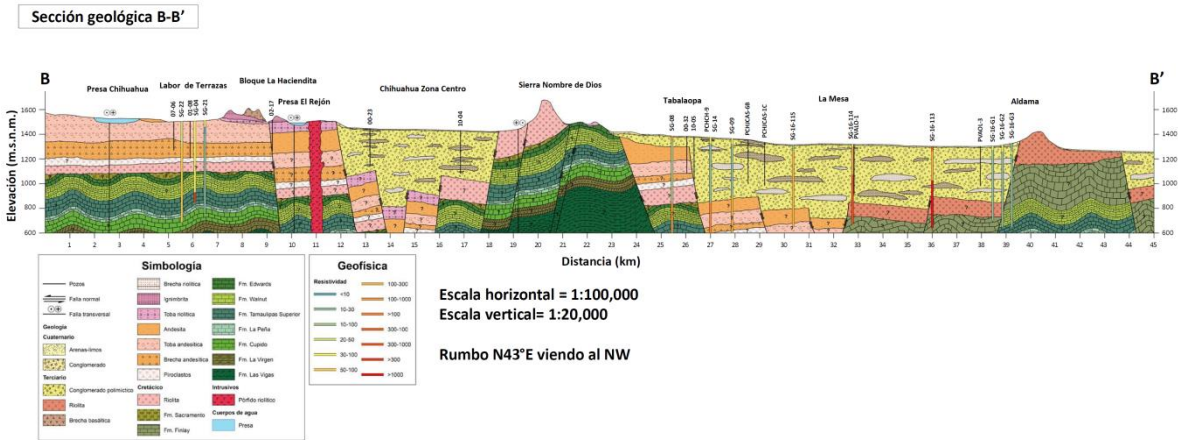


Figura 23. Sección geológica B-B' con información geofísica de la JCAS.

La información litológica se obtuvo de 12 pozos, determinándose una base sedimentaria cretácica con plegamiento, seguida de la Fm. Sacramento (conglomerado). Sobreyacen rocas volcánicas del Cretácico-Paleógeno que incluye basaltos, tobas riolíticas,

brechas, secuencias ignimbríticas, andesitas y riolitas, con un espesor en conjunto aproximado de 400 a 500 metros. El espesor de las rocas extrusivas disminuye hacia el final de la sección donde dominan las rocas sedimentarias del Cretácico. Conglomerados, arenas y limos rellenan las cuencas con hasta 350 m de profundidad. En la porción de la presa El Rejón se observa un pórfido de composición riolítica.

La sección geológica C-C' (Figura 24) se distribuye de manera longitudinal en la fosa Chihuahua, cerca de las serranías al oeste de la ciudad, con rumbo NW-SE.

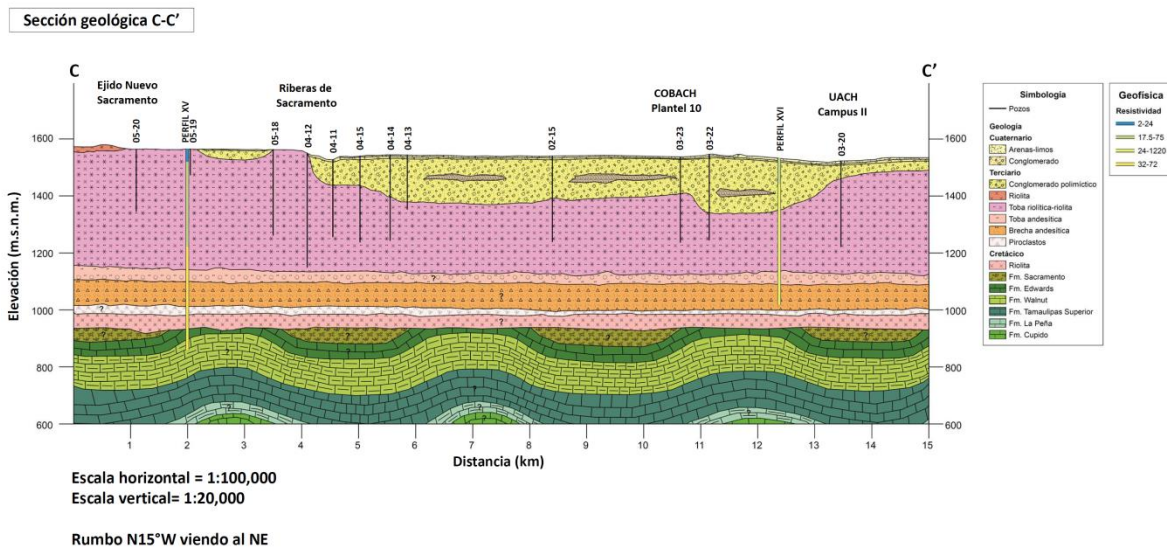


Figura 24. Sección geológica C-C' con información geofísica de la JCAS.

Se identificaron intercalaciones de toba riolítica, riolita y secuencias ignimbríticas en todos los pozos (12), así como material clástico hacia la parte superior, correspondiente al material de relleno de fosa tectónica. Se interpretaron porciones localizadas de conglomerado de la Formación Sacramento y andesitas. Por debajo de los 1,250 m.s.n.m. se ubican las rocas sedimentarias cretácicas.



3.2 HIDROGEOLOGÍA

3.2.1 Unidades hidrogeológicas y direcciones de flujo

En estudios previos realizados se han determinado distintas unidades para cada una de las tres regiones que conforman la zona de estudio (JCAS *et al.*, 2013a, 2013b, 2013c). Cada unidad agrupa diferentes tipos de roca según el medio por el que transita el agua, su grado de permeabilidad y el rango de conductividad hidráulica, el cual se indica como valores de referencia tomados de *MODFLOW* y de Anderson *et al.* (2015).

Los datos piezométricos del año 2011 de esos mismos estudios (JCAS *et al.*, 2013a, 2013b, 2013c) permiten identificar y relacionar el flujo del agua subterránea con los diferentes medios o unidades hidrogeológicas dentro de la zona. En la Tabla 5 se integra la información hidroestratigráfica del área de estudio.

Tabla 5. Resumen adaptado de las unidades hidroestratigráficas (JCAS et al., 2013a, 2013b, 2013c).

Unidad	Medio	Formaciones geológicas	Grado de permeabilidad	*Rango de conductividad hidráulica (m/d)
UH 1	Disolución o Fracturado	Caliza	Medio a alto	1×10^{-2}
UH 2	Fracturado	Andesitas, riolitas, caliza-lutita, basaltos, metalutitas, metareniscas, pórfidos	Medio a bajo	1×10^{-4} a 1×10^{-7}
UH 3	Fracturado	Tobas riolíticas-ignimbritas, riolitas, granito, andesitas, brechas, dacita	Bajo	1×10^{-7}
UH 4	Fracturado y granular	Conglomerados, basaltos, andesitas basálticas, andesitas	Medio	10 a 1×10^{-3}
UH 5	Granular	Arenas-limos, conglomerados, aluvión	Medio a elevado	0.1 a 302.4

Elevación del nivel estático en la región centro-norte.

La configuración de elevación del nivel estático para el año ya mencionado mostró una variación entre los 1,450 y 1,570 m.s.n.m., con una disminución hacia la parte central

de esta región. Las mayores elevaciones se localizaron hacia la porción occidental y oriental (hacia las serranías), indicando una recarga en cada uno de estos flancos; la disminución del nivel continuó hacia el centro de manera localizada (Figura 25). Lo anterior fue identificado en las inmediaciones de la Laguna de Encinillas en donde la elevación fue de 1520 m.s.n.m., al igual que al norte de El Sauz; mientras que al sur de Estación Terrazas fue notorio un mayor gradiente, significando un cono de abatimiento que alcanza los 1450 m.s.n.m.

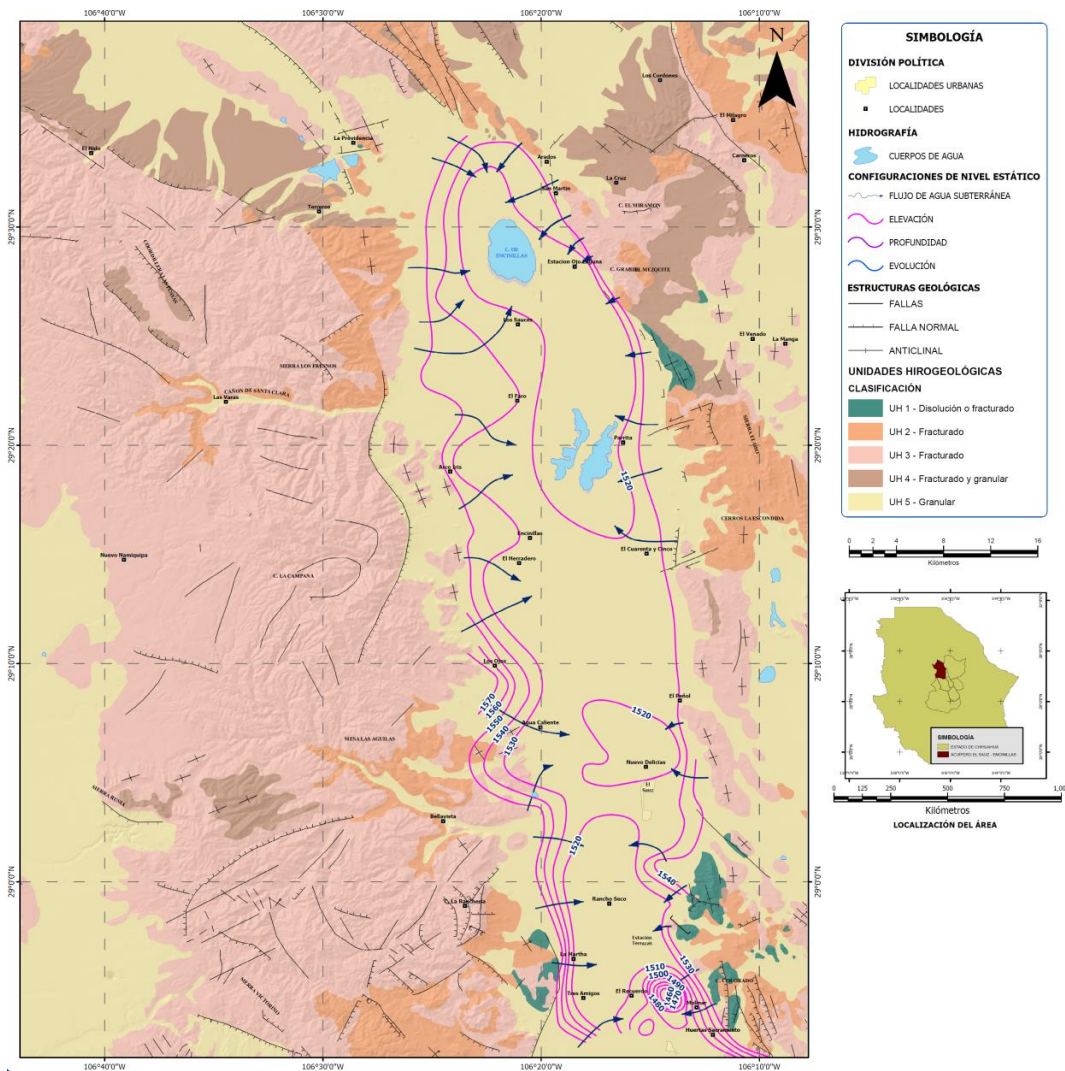


Figura 25. Unidades hidroestratigráficas y direcciones de flujo en la región centro-norte de la zona de estudio (JCAS *et al.*, 2013b).

Elevación del nivel estático en la región centro-sur.

Se identificó una divergencia en la dirección del flujo en la parte central, donde la recarga se sitúa en las sierras. El rango de elevaciones fue de 1580 a 1350 m.s.n.m. Las menores elevaciones convergieron hacia la parte oriental de la ciudad de Chihuahua, donde se localizó un cono de abatimiento debido a la extracción en ese punto (Figura 26).

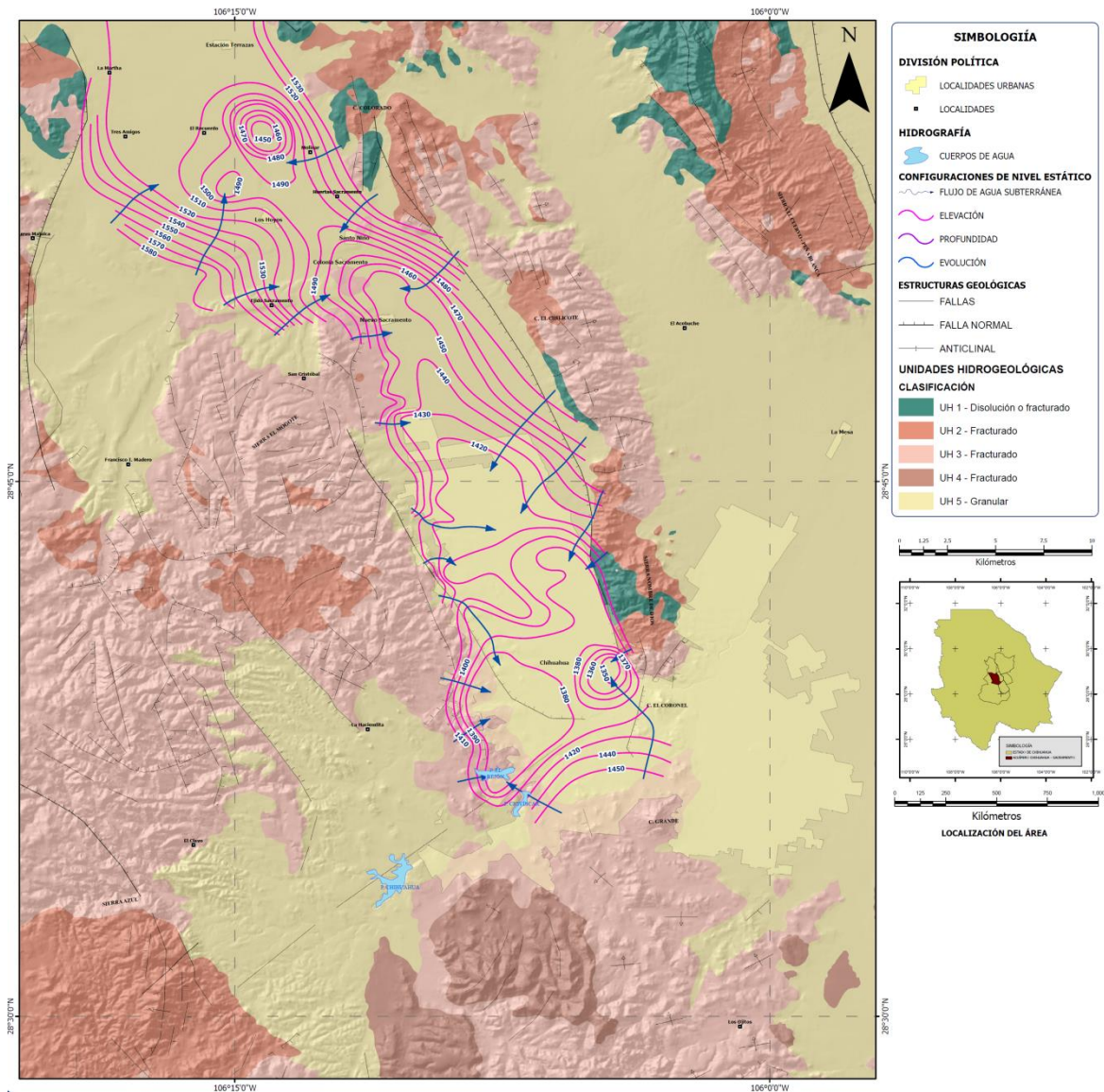


Figura 26. Unidades hidroestratigráficas y direcciones de flujo en la región centro-sur de la zona de estudio (JCAS *et al.*, 2013a).

Elevación del nivel estático en la región centro-este.

El nivel estático tuvo un rango de elevación de entre los 1,260 y 1,380 m.s.n.m. La mayor elevación se delimitó en la parte sureste de la ciudad de Chihuahua, con disminución en dirección noreste (Figura 27). Las zonas de recarga se centraron en las sierras Nombre de Dios, El Cuervo y San Ignacio; de manera lateral, la recarga proviene de la región centro-sur de la zona de estudio (mencionada anteriormente).

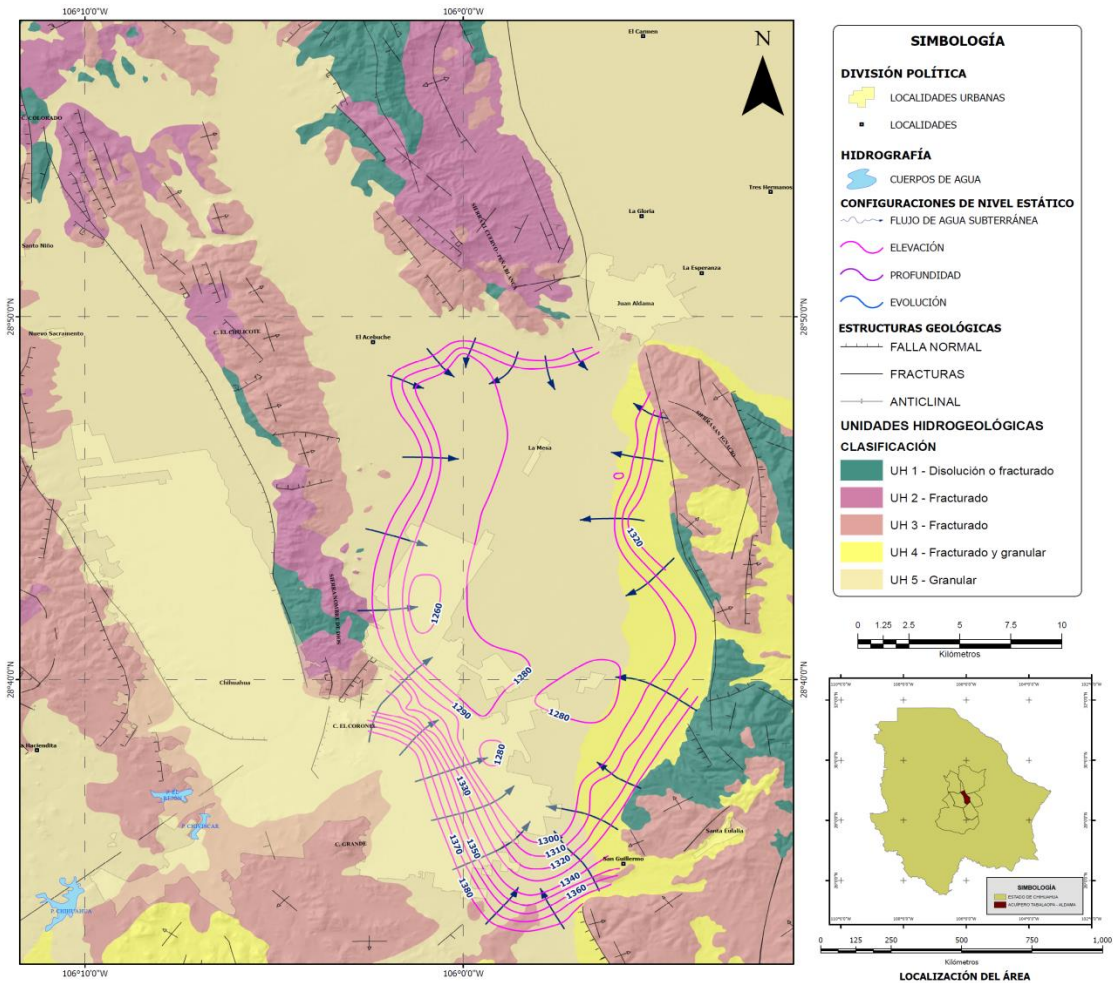


Figura 27. Unidades hidroestratigráficas y direcciones de flujo en la región centro-sureste de la zona de estudio (JCAS *et al.*, 2013c).



3.2.2 Tipo de medios por los que circula el agua subterránea

El medio granular o poroso y el fracturado son los principales medios a través de los cuales circula el agua. La distribución del medio poroso corresponde a la parte de valle que representa la fosa tectónica donde se depositan los sedimentos de diversa granulometría y es donde se localizan preferencialmente los aprovechamientos de agua subterránea, tanto para abastecimiento de agua potable como para uso agrícola. Su espesor también es variable, con una notoria disminución hacia las inmediaciones de las sierras; su permeabilidad en conjunto es media-elevada.

El medio fracturado (principalmente ígneo) contribuye a la recarga de los sistemas acuíferos en superficie; mientras que a profundidad el fracturamiento en rocas volcánicas y sedimentarias (calizas) permite la movilidad del agua (permeabilidad de baja a media).

3.2.3 Tipos de acuíferos

Debido a la presencia de diferentes materiales geológicos, tanto horizontal como verticalmente, los cuales constituyen el medio poroso y fracturado, se puede establecer que los acuíferos son del tipo heterogéneo, indicando un cambio de propiedades de manera espacial. La variabilidad de las características en los materiales se refleja en medios anisotrópicos. A manera general se puede considerar acuíferos libres a semiconfinados, debido a la intercalación de materiales de menor permeabilidad de manera localizada.

3.2.4 Propiedades hidráulicas

La conductividad hidráulica reportada en el medio poroso hacia el área de El Sauz se encuentra en el orden de 1.4×10^{-4} a 7×10^{-5} m/s, constituido de arenas y arenas limosas. Los mayores valores fueron registrados hacia donde se cuenta con un mayor espesor del material de relleno. En pruebas efectuadas en el medio fracturado, la conductividad hidráulica fue calculada en un orden de 4.9×10^{-5} a 5×10^{-5} m/s (Ingeniería de Evaluación y Prospección S.A. de C.V., 1996).



Según estudios realizados al oeste de la ciudad de Chihuahua, se determinó una transmisividad de entre $5 \text{ m}^2/\text{d}$ y $1200 \text{ m}^2/\text{d}$ (5.8×10^{-5} a $13.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$), con un promedio de $433 \text{ m}^2/\text{d}$ ($5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$); mientras que la conductividad hidráulica se encontraba en un rango de 0.04 a 8.8 m/d (4.6×10^{-7} a $1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$) (CONAGUA, 2020a).

Hacia el norte, rumbo a El Sauz la transmisividad varía de 24 a $455 \text{ m}^2/\text{d}$ (0.3 a $5.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$), siendo el promedio de $191 \text{ m}^2/\text{día}$ ($2.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$), y una conductividad de 1.1 m/d ($1.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$) (CONAGUA, 2020c). Mientras que Villalobos-Aragón *et al.* (2019) reportan una transmisividad de entre 1.5×10^{-3} a $12 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, presente en sedimentos de permeabilidad media a alta. Dicho material muestra interestratificación con las rocas volcánicas circundantes.

En el área delimitada entre la porción este de la ciudad de Chihuahua y Juan Aldama, se reportaron valores de transmisividad que varían entre 4.3 y $4800 \text{ m}^2/\text{d}$, mientras que los valores de conductividad oscilan entre 0.0085 y 9.7632 m/d (CONAGUA, 2020d). Esta zona se considera altamente permeable tomando en cuenta que se conforma principalmente de aluvión con una transmisividad de $0.012 \text{ m}^2/\text{s}$ (Reyes-Gómez *et al.*, 2013).

Mahlknecht *et al.* (2008) reportan valores de conductividad hidráulica horizontal de aproximadamente 8 m/d , en depósitos aluviales, ignimbritas terciarias (sic) y tobas riolíticas; por otro lado, los conglomerados terciarios presentan valores 0.1 m/d para este mismo parámetro.

En un estudio para el desarrollo de un proyecto de recarga gestionada al sistema acuífero, realizado hacia la porción este de la zona de estudio (Palma Nava *et al.*, 2018), se determinó la conductividad hidráulica saturada (K_s) mediante una modelación en la sección geológica conceptual del lugar de recarga piloto, obteniendo valores de 0.70 m/d para el aluvión, 1.06 m/d en grava, 0.31 m/d en la arena-limosa, 2.10 m/d para otra porción de grava y 0.10 m/d en limo.



Capítulo 4: Metodología

4.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

4.1.1 *Recopilación de información*

Se recopiló información de estudios previos en la zona, tanto de reconocimiento geológico como hidrogeológico. Se extrajeron y resumieron los datos necesarios de cada uno de ellos.

4.1.2 *Censo de aprovechamientos*

Con información de los aprovechamientos proporcionada por la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de la ciudad de Chihuahua, se realizó una base de datos de distribución, rendimiento y características generales de los pozos, además de contar con cortes litológicos de algunos de ellos. A partir de lo anterior, se definieron los puntos de interés para muestreo, complementados por información de pozos utilizados en investigaciones anteriores.

4.1.3 *Selección de puntos de muestreo*

Previo a la selección de los sitios, se realizó una base de datos de la química de todos ellos. Estos mismos puntos fueron plasmados en un mapa con las respectivas concentraciones de fluoruro. Se seleccionaron los pozos que registraran las mayores concentraciones, así como algunos pozos con menores concentraciones, con la finalidad de realizar una comparación de miembros extremos.

Entre otros factores que se consideraron fue el que los pozos contaran con corte litológico y que estuvieran en operación, por lo que gran parte de los sitios que fueron seleccionados contaron con estas características.

Por parte de la UASLP se tomaron muestras de rocas y sedimentos en algunos de los puntos. La campaña de muestreo se presenta en la Figura 28 y dos de los pozos visitados en la Figura 29 y Figura 30.

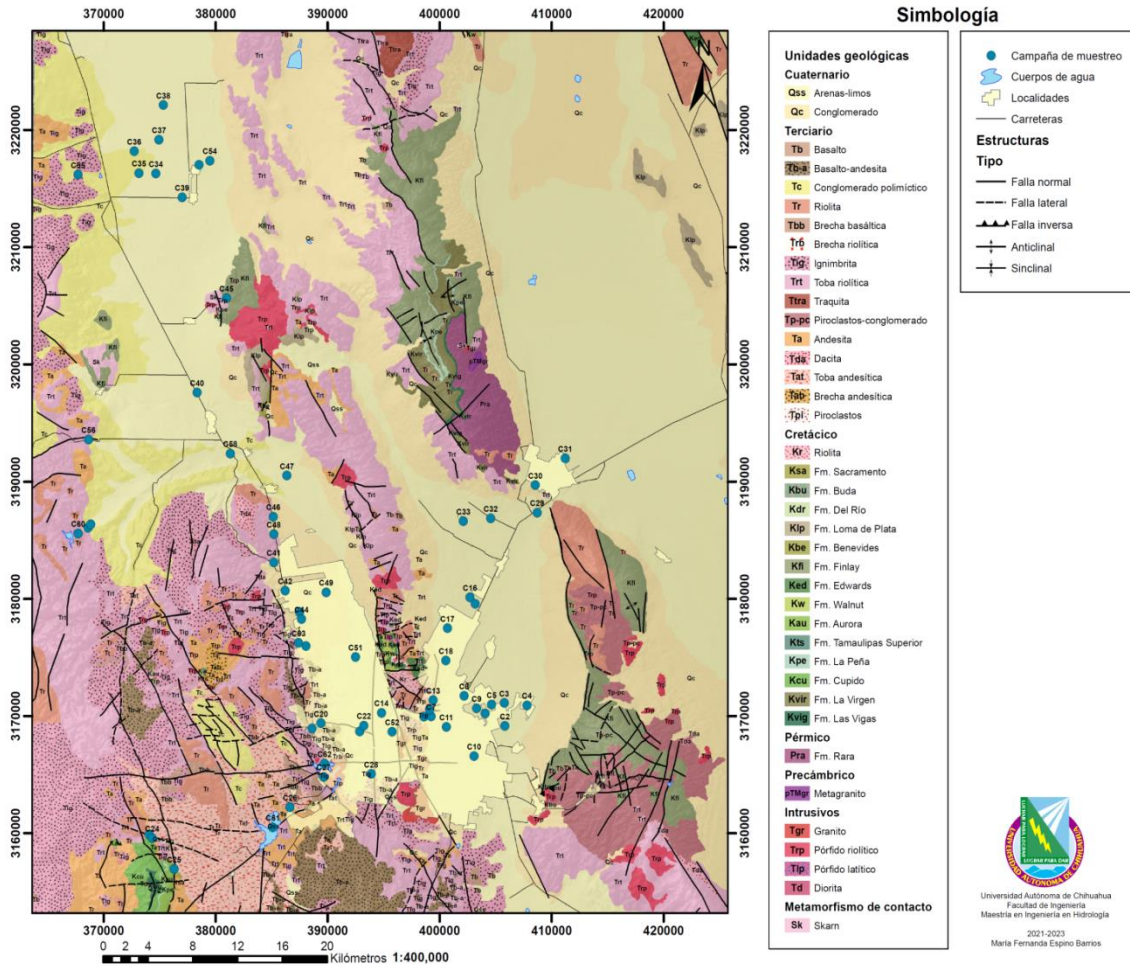


Figura 28. Campaña de muestreo, junio 2021.



Figura 29. Pozo C-6 de la campaña de muestreo. Foto: Fernanda Espino, 2021.



Figura 30. Pozo C-9 de la campaña de muestreo. Foto: Fernanda Espino, 2021.

4.2 MATERIAL Y EQUIPO

El trabajo realizado en campo se integró de la toma de muestras de agua y registro de información fisicoquímica obtenida *in situ* en cada uno de los sitios visitados. En la Tabla 6 se enlista por categorías los diferentes materiales e instrumentos que fueron necesarios durante la campaña de muestreo.

Tabla 6. Material y equipo utilizado en campo.

Categoría	Material y equipo
Parámetros fisicoquímicos	Sonda multiparamétrica YSI (T°C, O.D., C.E., pH y ORP), celda de aislamiento, titulador digital (HACH), potenciómetro, estándares de pH 4 y 7.
Toma de muestras	Envases etiquetados de 1 L (fluoruros), 60 mL (cationes, metales y aniones), 15 mL (isótopos) y 500 mL (aniones); filtro de 0.45 μm y jeringas.
Registro de información	Fichas de campo, GPS, cámara fotográfica, portafolios y pizarrón.
Herramientas y complementos	Conector Y, mangueras, mesas de madera, vaso de precipitado, cubeta, jarra, hielera y hielo.
Compuestos químicos	Ácido sulfúrico y ácido nítrico.

4.3 MUESTREO DE AGUA Y DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CAMPO

4.3.1 *Temperatura, Oxígeno Disuelto (% y mg/L), CE, pH, ORP*

Para el muestreo se realizó la conexión hidráulica que permitió la conducción del agua desde la descarga del pozo hacia la celda de aislamiento. La serie de mangueras se conectó al pozo, haciendo uso de la llave Y. La sonda multiparamétrica *YSI Professional Series* se embonó en la sonda de aislamiento, se conectó la manguera y se encendió el equipo. Se debe lograr un flujo uniforme del agua para que de esta manera simule las condiciones del acuífero.

Lograr una estabilización de valores es necesario previo al registro de los datos. Por lo que, una vez iniciado el flujo a través de la celda, se esperó un minuto antes de anotar las lecturas registradas por la sonda (Figura 31). Posteriormente, el tiempo de espera entre cada lectura fue de dos minutos, para realizar un total de siete lecturas de cada parámetro aproximadamente. Los parámetros registrados en campo fueron temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH y potencial de óxido-reducción (ORP).



Figura 31. Sonda Multiparamétrica YSI Professional Plus.

a) Sonda multiparamétrica; b) celda de aislamiento; c) conexión de la descarga a la celda de aislamiento; d) lectura de los parámetros registrados.



4.3.2 Alcalinidad

La determinación de la alcalinidad en campo se realiza a través del Método de Titulación de Gran, en el cual la intención es llegar al punto de equivalencia (pH de 4.3) donde los bicarbonatos y carbonatos han sido eliminados de la muestra al añadirle ácido sulfúrico. Este procedimiento debe ser realizado en campo debido a la facilidad de alteración que tiene el agua al estar en contacto atmosférico.

Esta evaluación requirió de 50 mL de muestra, a la cual se le agregó ácido sulfúrico con la ayuda de un titulador digital (*HACH*). El pH se determinó mediante un potenciómetro (*Conductronic*, calibrado con estándares de pH 4 y 7). Se registró el número de vueltas del titulador y el pH que alcanzó el agua (Figura 32). Esta prueba busca llegar al límite de pH de 4.3, para posteriormente registrar de tres a cuatro puntos de control (agregar más ácido).

Los resultados fueron procesados en la calculadora de alcalinidad del Servicio Geológico de Estados Unidos, promediando los resultados.



Figura 32. Potenciómetro. Determinación de la alcalinidad (Método de Titulación de Gran). Foto: Fernanda Espino, 2021; Cristian Rivera, 2021.



4.3.3 Toma de muestras de agua

Se realizó el muestreo de 63 sitios en las fechas del 08 al 17 de junio del 2021 y la toma de la última muestra fue el 24 de junio, abarcando las ciudades de Chihuahua, Aldama y las áreas cercanas a El Sauz, Sacramento y Chuvíscar. Entre las muestras recolectadas se encuentran 55 pozos, 3 norias, 3 presas, 1 manantial y 1 muestra de agua de lluvia.

Todos los envases fueron enjuagados con agua de los aprovechamientos al momento del muestreo. El agua fue filtrada con membranas de 0.45 micras. Las muestras se almacenaron en la hielera para evitar su alteración hasta el momento de su refrigeración. Las muestras se tomaron en envases de diferentes capacidades: 15 mL, 60 mL, 500 mL y 1 L. La conservación de éstas evita posibles cambios químicos debido a las diferentes condiciones que se encuentran en superficie (Figura 33).



Figura 33. Preparación para la toma de muestras de agua en recipientes de diferente capacidad. Foto: Fernanda Espino, 2021.

Preservar una muestra de manera íntegra no se puede lograr de manera completa, debido a la variabilidad de cada constituyente. Sin embargo, la preservación permite el retardo de diversos cambios químicos y biológicos que continúan dentro de la muestra (UNAM, 2019).



Los cambios químicos incluyen el cambio de la estructura química, la precipitación de cationes metálicos (como hidróxidos u otros complejos), los iones pueden cambiar su estado de valencia (oxidación y reducción), mientras otros son objeto de disolución, volatilización o adsorción (cationes metálicos). Mientras que los cambios biológicos pueden influir en la valencia, los constituyentes solubles podrían resultar en una ruptura celular y composición de la muestra (UNAM, 2019).

Para la conservación de cationes y metales fue añadido ácido nítrico concentrado a las dos muestras de 60 mL recolectadas en cada punto; para la determinación de nitratos se preservó otra muestra de 60 mL con ácido sulfúrico, mientras que el resto de las muestras recabadas solo se filtraron.

Gran parte del total de las muestras fueron filtradas con una membrana de 0.45 μm , salvo por puntos en los que la turbiedad del agua imposibilitó su filtración. En esos casos, dicha actividad se realizó posteriormente en el laboratorio.

4.4 ANÁLISIS QUÍMICO

4.4.1 Análisis de laboratorio. Facultad de Ciencias Químicas UACH.

Fluoruros

La metodología utilizada para la determinación de este ion tomó como referencia la norma mexicana NMX-AA-077-SCFI-2001, llamada “Análisis De Aguas - Determinación de Fluoruros en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratada”, utilizando el electrodo de ion selectivo para ion fluoruro *Thermo Scientific Orion* y su respectivo potenciómetro portátil *Thermo Scientific Modelo Orion Star A Series*.

Para realizar la curva de calibración se prepararon estándares a partir de un estándar certificado de flúor de 100 ppm, de las siguientes concentraciones: 0.1, 0.3, 1, 3, 10 y 20 ppm. Para la lectura de los estándares, se agregó 1 mL de la solución TISAB II por cada mL de estándar y después se llevó a cabo la lectura con el potenciómetro.



La medición de las muestras se llevó a cabo de la misma manera que los estándares, 1 ml de la muestra más un 1 ml de TISAB II; con la ayuda del potenciómetro se obtuvieron las mediciones. Este proceso se realizó por duplicado.

4.4.2 Análisis de laboratorio. Facultad de Ingeniería UASLP.

Conductividad y pH

El análisis tanto de la conductividad como del pH requirió una previa calibración de los equipos correspondientes. Para la conductividad se utilizó el *Thermo Fisher Scientific*, el cual se calibra con un estándar de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El pH fue medido a partir del instrumento *Hach sension4* que se calibra a partir de tres estándares diferentes, uno de pH 4, otro 7 y un último de 10 (Figura 34).



Figura 34. Preparación y medición de pH de las muestras recolectadas en campo (UASLP). Foto: Fernanda Espino, 2021.

Para ambas determinaciones se tomaron alrededor de 40 a 50 mL de cada una de las muestras en vasos de precipitado. La misma porción de agua fue utilizada en ambos instrumentos, registrando los resultados en la libreta de laboratorio.



Alcalinidad

La prueba de alcalinidad requirió la toma de 25 mL de cada muestra a través de una pipeta aforada, depositando el líquido dentro de matraces Erlenmeyer. Se le adicionaron tres gotas de fenolftaleína en cada uno de los matraces, para la identificación de disoluciones básicas. En caso de no identificarse un cambio de color (rosado o fucsia) el indicador que se utilizaría sería el naranja de metilo (Figura 35).

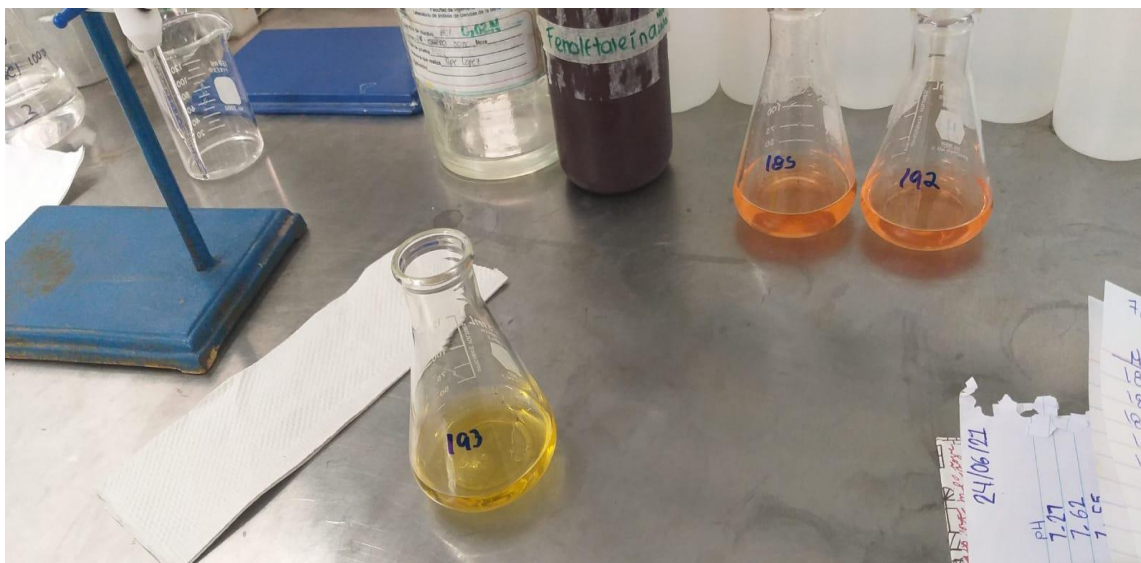


Figura 35. Preparación de las muestras para la determinación de alcalinidad (USALP). Foto: Fernanda Espino, 2021.

Dentro de una bureta se colocó ácido clorhídrico de 0.02 N, mismo que se añadió a cada muestra hasta lograr de nuevo la transparencia del líquido (en caso de usar fenolftaleína) o una tonalidad naranja (de haber usado naranja de metilo), registrando los mililitros necesarios para su cambio de color en cada una de las muestras.



Aniones

Sulfatos

La determinación de sulfatos (mg/L) es un método turbidimétrico, toma en cuenta la conductividad eléctrica que posee la muestra de agua, a mayor conductividad mayor dilución. En la Tabla 7 se establecen los rangos de conductividad eléctrica con su correspondiente relación de dilución.

Para la determinación se requieren 25 mL totales, el factor que cambia es el volumen de muestra de agua utilizada en la preparación de cada dilución; el primer valor indica el volumen recién mencionado y el segundo el agua destilada con la que se completa el volumen requerido (p.e. 10 mL de muestra y 15 mL de agua destilada, en el primer caso).

Tabla 7. Dilución para la determinación de sulfatos según los rangos de conductividad eléctrica.

Dilución para la determinación de sulfatos	
Rangos de conductividad eléctrica (microSiemens/cm)	Dilución
400 a 1000	10:25
1000 a 1400	5:25
1400 a 1500	2:25
1500 a 2000	1:25

El equipo utilizado fue el *HACH DR/2000 Spectrophotometer*. Dicho equipo necesita de dos porciones de agua a comparar, el llamado “blanco” y la muestra de agua. La preparación del “blanco” requirió el mismo trato que la muestra, lo que quiere decir que debe pasar por la misma dilución; por lo tanto, por cada muestra de agua se tomaron dos porciones, una para el blanco y otra para la determinación.

El blanco será la solución que representa una concentración de 0 mg/L, con la cual se comparará la otra parte. A la porción a analizar se le añadió *SulfaVer*, un reactivo que contiene cloruro de bario, dihidrato y ácido cítrico que permite la precipitación de los sulfatos y la suspensión de sulfato de bario. Una vez agregado el reactivo se debe agitar la muestra durante un minuto y dejar reposar por cinco minutos, para la precipitación de los sulfatos.



Transcurrido ese tiempo, se vertió el blanco en una de las celdas y se introdujo al equipo para indicarlo como el estándar, después se insertó la muestra y por comparación se determinó la concentración de sulfato. El procedimiento se repitió con cada una de las muestras (Figura 36).

* Nota: el blanco es la muestra sin reactivo.



Figura 36. Determinación de sulfatos (UASLP). Foto: Fernanda Espino, 2021.

Nitratos

El análisis de los nitratos (mg/L N-NO_3) se llevó a cabo por medio de método colorimétrico. Cuando se tomaron las muestras de agua en campo éstas se conservaron con ácido sulfúrico, lo que evita que los nitratos reaccionen y se precipiten, el ácido los mantiene en disolución.

Este mismo ácido provee un pH entre 2 y 3; sin embargo, la determinación requirió un pH neutro a básico, es decir, entre 7 y 9. Por lo anterior, fue necesario tomar alrededor de 30 mL de cada una de las muestras y neutralizarlas con hidróxido de sodio. En caso de pasar el pH de 9, éste se reduce añadiendo ácido sulfúrico.



Para el blanco se tomó una alícuota de 25 mL de agua destilada, con la cual se compararon las muestras de agua. De cada una de ellas se tomó una porción de 25 mL, a la que se le añadió el reactivo *NitraVer*, pasaron por un minuto de agitación y cinco minutos de reposo. Se introdujo el blanco y se determinó como el estándar, después se fueron ingresando las muestras y registrando las concentraciones de nitratos (Figura 37).



Figura 37. Neutralización de las muestras de agua para la determinación de nitratos (UASLP). Foto: Fernanda Espino, 2021.

Cloruros

Para la prueba de cloruros fue necesario medir la concentración del nitrato de plata (AgNO_3) que se depositó en la bureta (0.014 N). En un matraz Erlenmeyer se agregaron 5 mL de cloruro de sodio (NaCl); como indicador se utilizó el cromato de potasio (K_2CrO_4), el cual otorga un pigmento entre amarillo y verde.

Generalmente, la cantidad que se use de nitrato de plata es parecida a la cantidad agregada de cloruro de sodio al matraz, hasta alcanzar una tonalidad toronja. Esta prueba ($\text{NaCl} + \text{K}_2\text{CrO}_4 + \text{AgNO}_3$) se realizó de dos a tres veces, para obtener un promedio y con ello tener como resultado la normalidad del nitrato de plata.



Una vez hecho lo anterior, se procedió a realizar la prueba en las muestras de agua. Se tomaron 25 mL de cada una y se colocaron en matraces Erlenmeyer, agregando tres gotas del indicador anteriormente mencionado. Se registró los mililitros de nitrato de plata que fueron necesarios para el cambio de coloración a toronja en cada una de las muestras (Figura 38).

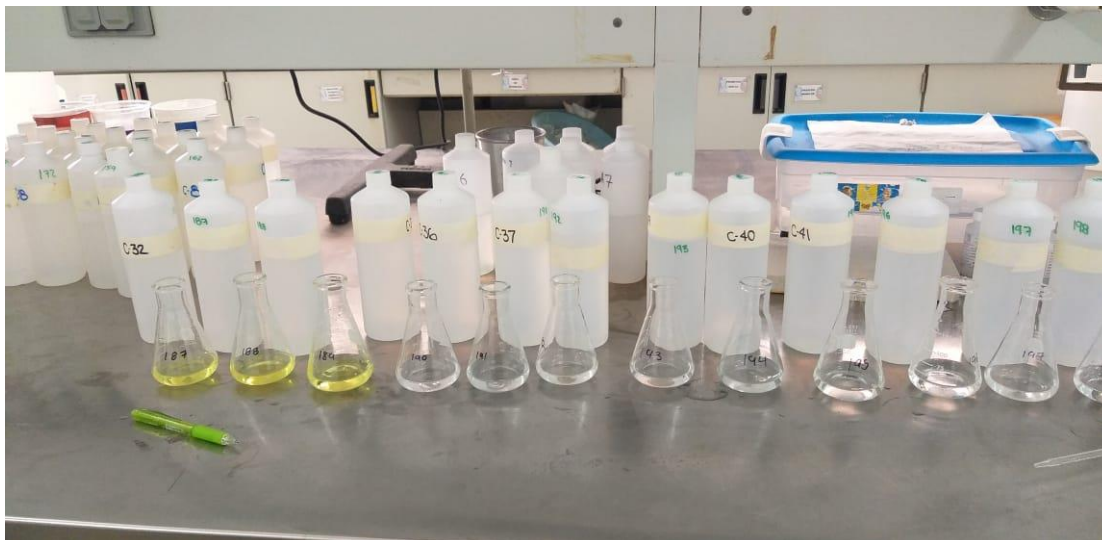


Figura 38. Determinación de cloruros (UASLP). Foto: Fernanda Espino, 2021.

Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS). Análisis multielemental y de elementos traza.

Este instrumento tiene la capacidad de determinar cuantitativamente la mayor parte de los elementos de la tabla periódica (incluyendo elementos de tierras raras, elementos traza y ultra traza) gracias a su alta sensibilidad; no analiza elementos inferiores al sodio, salvo litio, boro y berilio. Capaz de determinar bajas concentraciones de partes por billón e incluso de partes por trillón (Mansilla-Cuesta *et al.*, 2020).

La muestra se debe introducir en forma líquida por medio de una bomba peristáltica, para una posterior nebulización dentro de la cámara de pulverización (Figura 39). El aerosol se inyecta en un plasma de argón que posee temperaturas de entre 6000 y 8000 K (Radboud University, 2021). Los átomos en la muestra se ionizan para pasar al filtro



cuadrupolar a través de una interface de vacío, donde se separan según su carga/masa. Dichas masas se detectan para evaluar las concentraciones presentes en la muestra (Mansilla-Cuesta *et al.*, 2020).



Figura 39. Análisis multielemental en ICP-MS (UASLP). Foto: Fernanda Espino, 2021.

Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES). Análisis multielemental.

Este instrumento realiza determinaciones multielementales, tiene la capacidad de cuantificar la mayoría de los elementos de la tabla periódica, con excepción del carbono, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y flúor, gases nobles, algunas tierras raras, en concentraciones desde porcentaje hasta partes por billón (Instituto de Catálisis y Petroleoquímica, 2019).

Al igual que en el ICP-MS, la muestra es introducida a un sistema de nebulización para la generación de un aerosol que es transportado por el gas argón a la antorcha del plasma (Figura 40). Una vez ahí, gracias a las altas temperaturas, los analitos se atomizan e ionizan, creando espectros de emisión atómicos (Laboratorio de Técnicas Instrumentales



UVa, 2021). Las emisiones de los átomos se recogen mediante un sistema óptico que tiene base en un policromador combinado con detectores CCD, lo que resulta en espectros de emisión para las líneas seleccionadas para cada elemento (Instituto de Catálisis y Petroleoquímica, 2019).

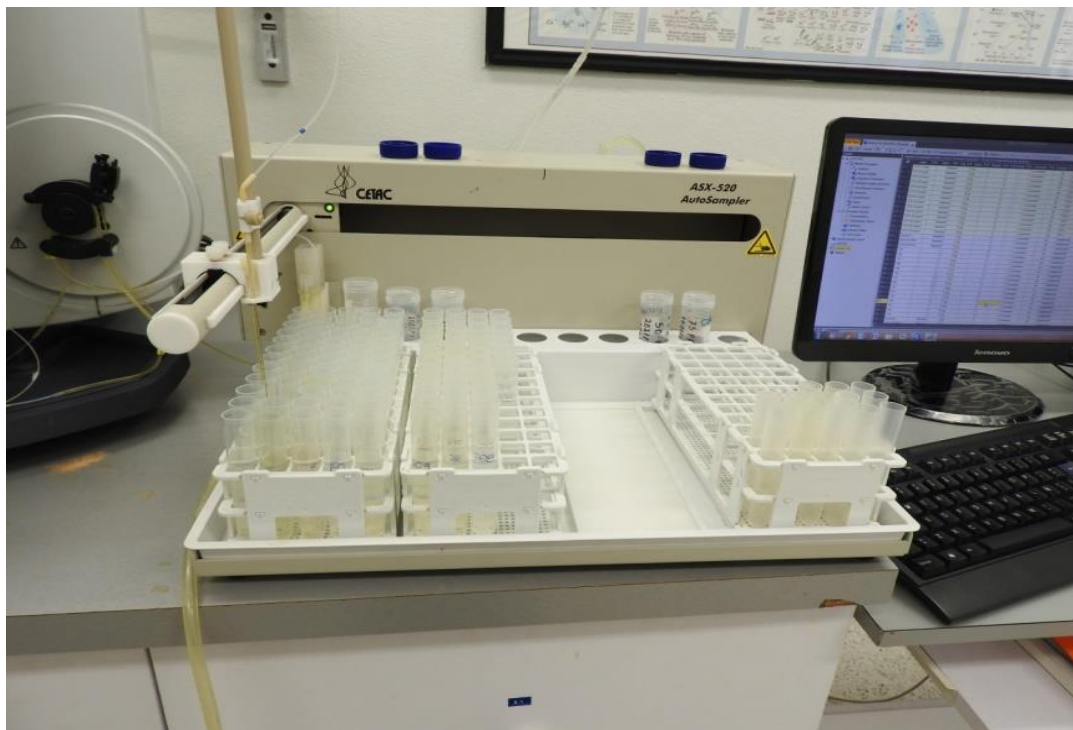


Figura 40. Análisis multielemental en ICP-OES (UASLP). Foto: Fernanda Espino, 2021.



Capítulo 5: Resultados de campo y laboratorio

5.1 RESULTADOS DE CAMPO

5.1.1 *Temperatura*

Los datos obtenidos variaron en un rango de 13.70 y 33.90°C. Dichos extremos representan condiciones diferentes; el valor mínimo se registró en un cuerpo de agua (Presa San Marcos), por lo que la interacción atmosférica tiene efecto directo en éste. El valor máximo proviene de un pozo de agua potable en la localidad de El Sauz. Mientras que el resto de los puntos se delimitaron principalmente entre los 20 y 30°C. Los resultados se muestran en la Tabla 8. Los rangos antes mencionados coinciden o son parecidos a los obtenidos en otros estudios en la zona, como los mencionados en la Tabla 2.

La temperatura en un ambiente subterráneo es prácticamente constante debido a un equilibrio calorífico, es decir, no es afectado por las variaciones temporales de temperatura debido a su profundidad. Por lo tanto, cualquier variación puede ser atribuida al medio en el que se encuentre el agua y su interacción química con éste.

5.1.2 *Oxígeno Disuelto*

El oxígeno disuelto (%) registrado tuvo una variación de entre 4.60 a 119.10 %. Por otro lado, se reportaron valores de 0.42 a 9.79 mg/L.

El oxígeno en el agua subterránea señala una exposición atmosférica, por lo que se podría considerar que a mayor contenido de oxígeno disuelto indica una menor profundidad de flujo o bien menor tiempo de residencia. El oxígeno disuelto es importante en las reacciones químicas gracias a su capacidad de oxidación de componentes y, por ende, de la solubilidad de estos (IGME, 2000).



Tabla 8. Resultados obtenidos en campo.

Clave	Localización	Tipo	Coordenadas		T (°C)	pH	ORP	Eh (mV)	C.E. (uS/cm)	O.D. (mg/L)	O.D. (%)	Alk (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)
			X (UTM)	Y (UTM)									
C1	Puerta Chihuahua 2	1	404048.41	3170225.14	28.30	7.76	68.00	291.37	453.50	4.99	63.90	143.93	174.17
C2	Privadas del sur 1	1	405816.00	3169136.00	23.60	7.50	81.60	305.44	302.60	5.90	69.60	149.15	181.23
C3	Puerta Chihuahua 6	1	405762.67	3171112.88	25.00	7.49	73.30	297.00	528.00	4.14	50.10	130.00	157.87
C4	Puerta Chihuahua 8	1	407791.46	3170919.80	24.50	7.52	82.50	306.25	347.90	5.70	68.40	144.60	175.60
C5	Puerta Chihuahua 1	1	404627.13	3170978.74	27.60	7.74	83.00	306.44	410.80	3.29	41.80	145.18	175.78
C6	Robinson 2	1	398595.70	3169939.57	31.00	7.35	79.90	303.00	747.00	1.82	29.50	196.90	239.27
C7	Robinson 1	1	399223.02	3169953.10	29.10	7.23	70.00	293.29	715.00	1.78	23.20	203.20	247.20
C8	Robinson 3	1	402167.29	3171723.28	26.70	7.52	285.70	509.23	542.00	6.02	75.20	146.10	177.40
C9	Siaz - Impulso	1	403288.28	3170660.17	29.50	7.43	89.70	312.95	609.00	3.21	42.10	162.20	197.00
C10	Ranchería Juárez	1	403074.25	3166574.10	23.40	7.15	85.70	309.56	900.00	4.43	52.20	221.65	269.75
C11	Concordia	1	400598.56	3169063.22	29.50	7.29	421.70	644.95	655.00	1.80	23.70	185.93	226.17
C12	León 3	1	399078.96	3170561.13	32.10	7.28	88.50	311.49	686.00	1.55	21.20	183.20	222.75
C13	León	1	399414.87	3171349.99	30.80	7.23	88.10	311.22	706.00	1.75	23.50	203.50	247.50
C14	Centro de Convenciones	1	394798.47	3170261.51	26.60	7.62	81.40	304.94	619.00	4.31	54.00	181.45	220.05
C15	Tabalaoa N. de Dios 1	1	403171.44	3179575.88	25.10	7.39	85.00	308.69	652.00	9.79	119.10	162.10	197.10
C16	Tabalaoa N. de Dios 3	1	402697.00	3180116.61	25.30	7.31	87.20	310.87	716.00	5.19	63.30	203.95	248.05
C17	Tabalaoa Aldama 8	1	400691.96	3177485.98	25.60	7.73	85.50	309.14	493.00	6.55	80.30	152.93	185.13
C18	Tabalaoa Aldama 3	1	400545.31	3174738.35	24.50	7.48	84.70	308.45	474.50	9.34	112.40	181.55	220.55
C19	Panamericana 5	1	388599.07	3168945.11	28.20	7.36	83.20	306.58	428.50	3.53	45.30	180.05	218.90
C20	Panamericana 7	1	389386.89	3169382.26	29.30	7.38	311.00	534.27	482.10	4.50	58.80	197.43	239.97
C21	Mirador 2	1	392843.65	3168679.38	23.80	7.30	77.70	301.52	682.00	4.69	55.60	175.15	213.05
C22	San Felipe	1	393230.39	3169185.80	24.40	7.34	80.20	303.96	563.00	4.46	53.40	165.80	201.60
C23	Ojos del Chuviscar 6	1	374075.48	3159867.02	32.60	7.19	61.20	284.14	581.00	3.71	51.00	201.43	245.03
C24	Chuviscar	1	374333.04	3159575.94	25.10	7.01	60.90	284.59	482.70	3.97	48.10	229.83	279.90
C25	Sierra Azul Ojos	1	376297.04	3156940.38	27.50	7.01	56.00	279.45	494.20	4.19	53.20	205.40	250.15
C26	Parcela 62	1	386636.09	3162215.50	22.40	7.34	61.00	284.96	493.30	7.64	88.80	219.95	267.60
C27	La Salle	1	389641.90	3164797.13	29.70	7.15	68.20	291.43	612.00	2.93	38.70	210.95	256.70
C28	Cerro de la Cruz	1	393889.42	3165048.42	24.20	7.28	57.20	280.98	518.00	5.34	63.70	166.40	202.40
C29	Centro recreativo	1	408707.00	3187354.00	21.50	7.05	60.20	284.25	1450.00	6.77	77.00	258.77	315.03
C30	Tío Albert	1	408543.00	3189698.00	29.40	7.07	73.90	297.16	1070.00	3.29	43.30	219.85	267.65
C31	Santa Fe	1	411198.89	3191993.40	24.70	7.32	69.80	293.53	629.00	4.72	57.00	173.65	211.18
C32	El Bosque	1	404560.34	3186863.61	26.80	7.28	70.10	293.62	516.00	5.27	65.80	164.67	200.30
C33	El Acebuche	1	402124.00	3186619.00	25.50	7.48	84.20	307.85	609.00	3.96	48.20	156.00	189.47
C34	Sauz 24	1	374652.57	3216283.58	27.60	7.75	53.80	277.24	426.30	4.55	57.80	132.65	160.60
C35	Sauz 16	1	373151.25	3216332.68	33.90	7.57	53.30	276.11	591.00	3.54	50.60	145.15	175.95
C36	Sauz 18	1	372723.11	3218193.11	32.00	7.56	53.90	276.90	571.00	3.76	51.60	140.32	170.20
C37	Sauz 27	1	374951.90	3219177.45	25.70	7.66	70.00	293.63	461.10	4.16	51.10	140.35	170.15
C38	Sauz 30	1	375337.30	3222132.24	23.30	7.69	76.20	300.07	398.90	4.59	53.80	118.40	143.50
C39	La Manga	1	377008.00	3214261.00	20.90	7.51	83.80	307.91	160.40	8.33	92.80	69.60	84.60
C40	Sauz 5	1	378345.20	3197608.40	23.00	8.22	75.50	299.40	217.70	5.81	67.80	108.20	129.50
C41	Riberas de Sacramento 3	1	385186.33	3183103.47	28.90	7.41	69.40	292.71	566.00	3.67	47.70	157.40	191.23
C42	Impulso	1	386212.73	3180693.58	30.30	7.43	78.80	301.97	561.00	3.89	51.80	143.40	174.20
C43	Arroyos 3	1	387498.31	3178870.04	29.50	7.44	43.30	266.55	578.00	3.98	52.30	150.57	182.87
C44	Arroyos 1	1	387660.62	3178261.09	29.70	7.44	45.90	269.13	608.00	4.20	55.20	149.07	181.07
C45	EstTerrazas	1	380969.00	3205651.00	25.60	7.40	71.00	294.64	439.20	3.32	40.60	168.00	204.20
C46	Riberas de Sacramento 7	1	385157.73	3187013.56	25.90	7.67	53.50	277.11	437.00	3.87	47.70	142.05	172.25
C47	Riberas Sacramento 15	1	386360.69	3190518.00	21.40	7.62	77.00	301.06	302.90	5.03	56.80	122.10	148.20
C48	Riberas de Sacramento 6	1	385190.24	3185518.17	26.10	7.51	71.70	295.29	447.80	3.80	47.00	148.73	180.60
C49	Villas del Rey	1	389864.1	3180552.8	24.60	7.62	73.20	296.94	381.70	4.55	54.60	131.85	160.00
C50	Picacho 3	1	388082.3	3175976.0	30.90	7.42	80.50	303.61	558.00	3.57	47.80	143.43	174.27
C51	Revolución	1	392478.44	3175031.65	24.10	7.43	77.20	300.99	550.00	4.72	56.60	146.60	178.17
C52	Urnetá	1	395752.48	3168651.38	22.50	7.08	383.20	607.15	837.00	2.82	32.60	239.10	291.10
C53	Colonia Nuevas Delicias	2	378519.00	3217030.00	18.90	6.94	82.90	307.21	278.10	3.19	34.40	94.95	115.70
C54	Colonia Nuevas Delicias	1	379478.00	3217386.00	19.50	7.29	84.30	308.55	267.90	3.97	43.20	126.05	153.40
C55	Division del Norte	1	367721.00	3216202.00	21.40	7.14	73.80	297.86	245.60	3.33	37.60	112.40	136.90
C56	Nueva Majalca	2	368645.00	3193590.00	19.90	7.17	80.80	305.01	520.00	0.42	4.60	244.86	298.08
C57	San Marcos	3	368611.00	3186056.00	23.10	7.90	94.00	317.89	612.00	3.81	44.50	320.68	387.33
C58	Salsipuedes	1	381300.00	3192395.00	19.60	7.45	88.20	312.44	370.10	4.78	52.20	155.80	189.43
C59	Cueva El ensueño	2	368859.00	3186346.00	19.40	6.53	104.20	328.46	217.30	1.81	19.70	91.80	111.90
C60	Presa San Marcos	4	367738.00	3185569.00	13.70	6.67	-10.40	214.43	730.00	3.20	31.00	408.00	497.25
C61	Presa Chihuahua	4	385113.00	3160498.00	24.40	8.49	96.20	319.96	479.90	4.87	58.40	191.75	225.35
C62	Presa El Rujón	4	389728.00	3165923.00	24.60	8.33	82.33	306.07	369.00	4.38	52.60	201.00	239.00
C63	Agua de lluvia	5	387401.00	3176227.00	21.00	7.88	261.80	485.90	47.70	5.75	64.60	15.00	18.05

Tipo de aprovechamiento: (1) pozo, (2) noria, (3) manantial, (4) presa y (5) lluvia.



5.1.3 Conductividad Eléctrica

La menor conductividad registrada en el conjunto de muestras fue de 47.70 $\mu\text{S}/\text{cm}$, correspondiente al agua de lluvia, mientras que la máxima de 1450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ fue en un pozo de uso recreativo. A medida que los valores de conductividad eléctrica se elevan, indican una mayor cantidad de sales presentes, es decir, representa una mayor disolución y aportación del medio geológico. Además, se relaciona con una menor calidad del agua.

5.1.4 pH

Los resultados de todos los puntos de muestreo englobaron una variación de pH desde 6.53 hasta 8.49. El valor mínimo, cercano a la neutralidad ($\text{pH}=7$), corresponde a la noria “Cueva El Ensueño”; mientras que el máximo a la presa Chihuahua. Ambos valores son indicadores de una disminución de contenido de dióxido de carbono en el agua y un aumento de bicarbonato en la solución, sobre todo hacia el valor máximo registrado.

5.1.5 Potencial de Óxido-Reducción (O.R.P.)

Tales valores se encontraron en un rango de -10.40 a 421.70 mV. Conforme aumentan los valores del potencial de oxidación, aumenta la capacidad oxidante de las muestras, es decir, existe una mayor concentración de especies reducidas. Mientras que, en el valor mínimo registrado, al ser del signo contrario, indica que el lugar del que se tomó la muestra tiene una capacidad reductora (presencia de especies oxidadas).

5.1.6 Alcalinidad

La menor concentración, obtenida a través del promedio de los resultados obtenidos de la calculadora de alcalinidad del Servicio Geológico de Estados Unidos, fue de 15 mg/L y la máxima de 408 mg/L, el primer valor correspondiente a la muestra de lluvia y el segundo a la presa San Marcos, lo que indicaría una mayor cantidad de especies disueltas



provenientes de diferentes materiales que descargan en la presa, ocasionando el aumento en el valor de alcalinidad.

La alcalinidad toma en cuenta bicarbonatos y carbonatos, pero debido a que éstos últimos precipitan fácilmente en carbonatos de calcio, los bicarbonatos componen la mayor parte de ésta.

5.2 RESULTADOS DE LABORATORIO

En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio para los cationes y aniones mayores, así como la conductividad eléctrica, los sólidos totales disueltos, alcalinidad, dureza total y fluoruro. Mientras que los resultados de los instrumentos ICP se encuentran en el Apéndice I.

Tabla 9. Resultados de laboratorio de iones mayores y fluoruro.

Clave	C.E. (uS/cm)	STD (mg/L)	Alk (mg/L)	Dtot (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	Cl (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	F (mg/L)
C1	460	232	148	54.41	20.07	1.05	69.73	2.36	180.56	12.93	47.50	4.87	2.02
C2	323	163.5	156	97.18	29.08	5.97	29.35	2.04	190.32	6.47	4.00	4.43	0.49
C3	549	276.5	152	147.57	45.72	8.11	34.49	2.43	185.44	32.33	20.00	16.38	0.51
C4	368	186	140	103.81	36.40	3.14	31.68	1.82	170.80	12.93	12.00	11.95	0.56
C5	405	204.5	144	53.52	19.19	1.36	69.84	2.33	175.68	14.55	37.50	7.08	1.61
C6	689	346.5	200	152.59	48.95	7.37	102.88	2.97	244.00	19.40	47.50	158.48	3.76
C7	683	343.5	200	178.66	58.36	8.00	60.36	2.81	244.00	22.63	85.00	15.94	3.12
C8	550	277	144	91.65	31.20	3.34	73.47	3.09	175.68	22.63	67.50	15.49	2.10
C9	576	290	164	100.97	35.09	3.24	71.25	2.83	200.08	21.02	62.50	15.05	2.03
C10	962	483	220	301.50	91.53	17.72	79.20	2.41	268.40	42.03	177.50	42.05	1.13
C11	620	312	196	141.44	46.81	5.97	73.26	2.36	239.12	21.02	70.00	11.95	4.45
C12	618	311	188	137.15	47.51	4.49	76.27	2.28	229.36	19.40	70.00	11.95	4.43
C13	652	328	204	155.22	51.40	6.52	71.35	2.37	248.88	19.40	77.50	15.05	3.87
C14	600	302	184	118.95	41.93	3.46	82.39	2.50	224.48	19.40	65.00	18.59	1.54
C15	673	338.5	172	161.35	55.36	5.61	59.14	3.14	209.84	25.87	72.50	15.05	2.12
C16	700	352	204	209.04	72.24	6.96	65.66	3.23	248.88	27.48	100.00	20.36	3.34
C17	484	244	156	115.07	39.67	3.89	58.03	2.29	190.32	16.17	52.50	6.64	3.35
C18	570	287	184	143.88	48.09	5.78	69.14	2.27	224.48	21.02	67.50	9.30	3.20
C19	390	197	180	128.62	43.50	4.86	37.76	2.06	219.6	8.08	22.50	3.54	0.92
C20	440	222	196	130.87	46.23	3.75	49.40	2.12	239.12	9.70	35.00	3.98	1.21
C21	693	348.5	176	224.59	74.47	9.38	45.65	2.58	214.72	24.25	82.50	47.81	0.61
C22	565	284.5	164	171.92	57.82	6.69	45.54	3.13	200.08	16.17	55.00	37.63	0.75
C23	494	249	204	153.44	49.78	7.08	43.65	2.34	248.88	6.47	50.00	1.33	1.61
C24	477	240.5	228	235.60	84.31	6.09	10.97	1.15	278.16	12.93	27.50	2.21	1.01
C25	467	235.5	204	225.43	81.30	5.45	9.25	0.18	248.88	14.55	22.50	2.21	1.09
C26	512	258	208	160.46	53.91	6.27	57.18	0.28	253.76	12.93	42.50	20.81	1.09
C27	546	275	212	194.88	51.13	16.32	36.31	1.16	258.64	14.55	27.50	8.41	0.54
C28	524	264	164	179.00	64.68	4.25	34.19	0.97	200.08	12.93	55.00	29.22	0.38
C29	1627	815.5	276	443.57	139.75	22.98	120.57	4.99	336.72	74.37	225.00	31.87	2.29
C30	972	488	220	223.56	72.38	10.40	94.73	3.88	268.4	25.87	187.50	3.98	3.54
C31	560	282	172	158.91	56.75	4.18	62.76	2.23	209.84	22.63	95.00	5.31	1.37
C32	447	225.5	168	159.28	50.70	7.94	38.33	2.61	204.96	11.32	72.50	1.77	3.17



Continuación de **Tabla 9.** Resultados de laboratorio de iones mayores y fluoruro.

Clave	C.E. (uS/cm)	STD (mg/L)	Alk (mg/L)	Dtot (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	Cl (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	F (mg/L)
C33	522	263	156	179.51	58.04	8.40	38.14	2.65	190.32	9.70	102.50	1.77	2.59
C34	351	177.5	132	82.44	29.08	2.39	51.01	2.62	161.04	9.70	53.00	1.33	3.04
C35	432	218	144	74.99	26.55	2.11	63.60	2.65	175.68	11.32	67.50	0.44	4.96
C36	432	218	140	77.03	27.48	2.04	62.48	2.44	170.8	11.32	66.00	0.44	4.99
C37	397	200.5	144	85.02	30.30	2.27	59.85	2.27	175.68	11.32	68.00	1.33	3.65
C38	358	181	120	69.58	25.06	1.70	55.67	2.31	146.4	12.93	63.00	1.33	3.86
C39	162.1	83.05	72	56.75	17.60	3.11	14.03	1.86	87.84	6.47	5.00	0.44	0.49
C40	197.8	100.9	104	35.73	13.37	0.57	35.76	0.02	126.88	8.08	1.00	0.89	0.30
C41	475	239.5	160	107.59	39.38	2.25	62.64	1.67	195.2	11.32	80.50	0.89	3.48
C42	457	230.5	148	111.10	41.03	2.10	55.47	1.75	180.56	9.70	85.00	0.89	2.45
C43	458	231	152	111.68	41.50	1.95	60.62	1.83	185.44	11.32	82.50	1.33	3.34
C44	482	243	148	113.21	42.30	1.84	65.03	2.05	180.56	11.32	100.00	1.77	3.17
C45	379	191.5	156	148.75	49.03	6.39	24.63	1.99	190.32	8.08	37.00	2.66	1.35
C46	381	192.5	144	92.01	33.75	1.88	55.49	1.87	175.68	9.70	55.00	2.21	2.99
C47	291	147.5	124	97.44	35.28	2.27	29.27	1.39	151.28	4.85	28.00	2.21	0.84
C48	391	197.5	148	105.49	39.34	1.76	56.22	1.85	180.56	12.93	57.00	2.21	2.77
C49	343	173.5	132	102.69	38.82	1.40	47.51	1.43	161.04	9.70	54.00	6.64	1.38
C50	441	222.5	144	102.89	40.05	0.70	60.70	1.48	175.68	11.32	80.00	2.66	2.25
C51	498	251	148	131.87	48.92	2.36	57.05	2.06	180.56	19.40	77.50	19.03	2.18
C52	786	395	240	303.93	87.48	20.76	44.63	5.23	292.8	40.42	81.50	60.65	0.50
C53	282.6	143.3	96	108.58	32.48	6.67	16.49	2.59	117.12	11.32	15.00	34.97	0.43
C54	269.8	136.9	124	83.13	27.28	3.64	30.00	1.34	151.28	8.08	9.50	7.97	0.48
C55	238	121	108	97.87	30.70	5.15	18.11	1.63	131.76	8.08	9.00	11.51	0.55
C56	522	263	244	216.74	64.21	13.70	23.91	2.92	297.68	14.55	19.00	11.07	0.53
C57	563	283.5	320	258.33	81.91	13.07	22.93	5.37	390.4	6.47	2.50	12.39	1.04
C58	374	189	136	141.73	48.70	4.89	24.12	2.39	165.92	9.70	44.00	13.28	0.13
C59	217.9	110.95	96	85.33	27.79	3.87	15.65	2.52	117.12	9.70	6.00	5.31	0.24
C60	673	338.5	368	285.99	92.91	13.11	30.03	5.05	448.96	8.08	1.00	6.64	1.08
C61	441	222.5	184	144.84	34.29	14.38	38.04	9.48	224.48	21.02	26.00	0.89	0.83
C62	336	170	156	132.01	38.74	8.57	21.54	8.14	190.32	6.47	30.00	0.89	0.98
C63	40.9	22.45	8	16.13	6.30	0.10	1.24	0.01	9.76	4.85	0.00	1.77	0.25



Capítulo 6: Interpretación hidrogeoquímica y de calidad del agua

6.1 CONDICIÓN DE ELECTRONEUTRALIDAD

La electroneutralidad es un principio en el que se establece que en una solución acuosa el total o suma de la concentración de los cationes tiende a ser equivalente a la suma de la concentración de los aniones (Carrillo-Esper *et al.*, 2008). Es decir, la suma de las cargas eléctricas de los iones mayores es igual a cero.

A partir de lo anterior, se realizó un balance de electroneutralidad con los resultados obtenidos de laboratorio. Esto, además, indica el nivel de confiabilidad de los datos derivados de los análisis químicos. Para efectuar el balance fue necesario calcular la concentración en miliequivalentes de los iones mayores de cada una de las muestras.

El resultado de la sumatoria de las concentraciones de los miliequivalentes tanto de los cationes como de los aniones son los valores que se utilizan dentro de la siguiente fórmula para la determinación del error:

$$\% \text{ Error} = \left(\frac{\Sigma \text{ cationes} - \Sigma \text{ aniones}}{\Sigma \text{ cationes} + \Sigma \text{ aniones}} \right) * 100 \quad (1)$$

Tras el cálculo se obtuvo que el 55.56%, es decir, 35 de las 63 muestras, representaban un rango de error excelente, entre 0 y $\pm 2\%$. Por otro lado, 26 muestras, que representan el 41.27% del total tenían un rango bueno, mayor al $\pm 2\%$ pero menor al $\pm 5\%$. Mientras que las dos muestras restantes, en otras palabras el 3.17%, obtuvieron un rango de error aceptable del ± 5 a $\pm 10\%$. Los valores negativos representan una sumatoria de aniones superior a la de cationes y los positivos una sumatoria de cationes mayor.

Por todo lo anterior, se concluye que los resultados de laboratorio son precisos (Figura 41).

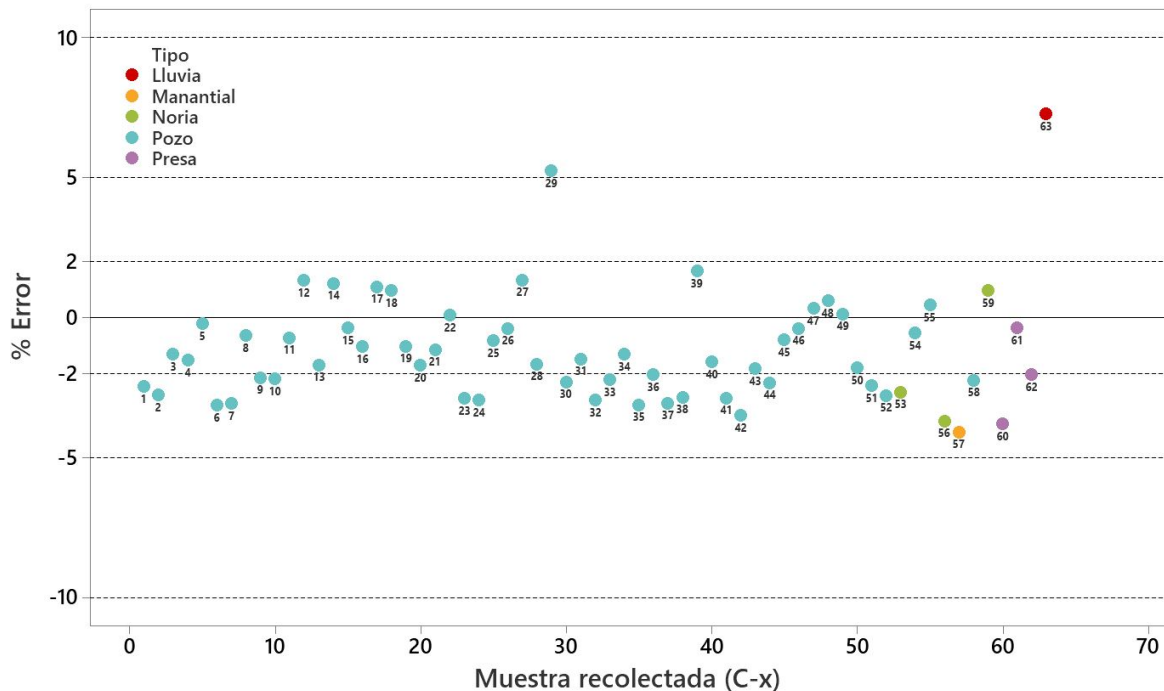


Figura 41. Balance de electroneutralidad por muestra.

De manera gráfica, el error puede representarse a través del diagrama de barras de Collins (Figura 42), en el cual figuran las concentraciones de los cationes y aniones, y de cierta manera también el dominio que tengan algunos de ellos. Partiendo del principio de la electroneutralidad, ambas barras (una para cationes y otra para aniones) deben ostentar la misma altura y/o elevación. De esta manera si una de las dos sobrepasa a la otra, indica una mayor concentración total de la especie química. Al no cumplirse el principio de electroneutralidad, esta diferencia de alturas, se interpreta como el error de cálculo.

Los valores de bicarbonatos utilizados en el balance iónico, así como en los análisis que se muestran a continuación, son los resultados de laboratorio. Si bien se evaluó la alcalinidad en campo, se consideró que aún existía cierta incertidumbre respecto a algunos resultados obtenidos, por lo que se optó por aplicar los datos de laboratorio para los parámetros de alcalinidad, bicarbonatos y carbonatos. En el balance iónico, un mayor



porcentaje de error resultó al utilizar los datos de campo (HCO_3^-); con los resultados de laboratorio los porcentajes de error se redujeron a rangos aceptables.

Los diagramas de Collins del total de las muestras se encuentran en el Apéndice II.

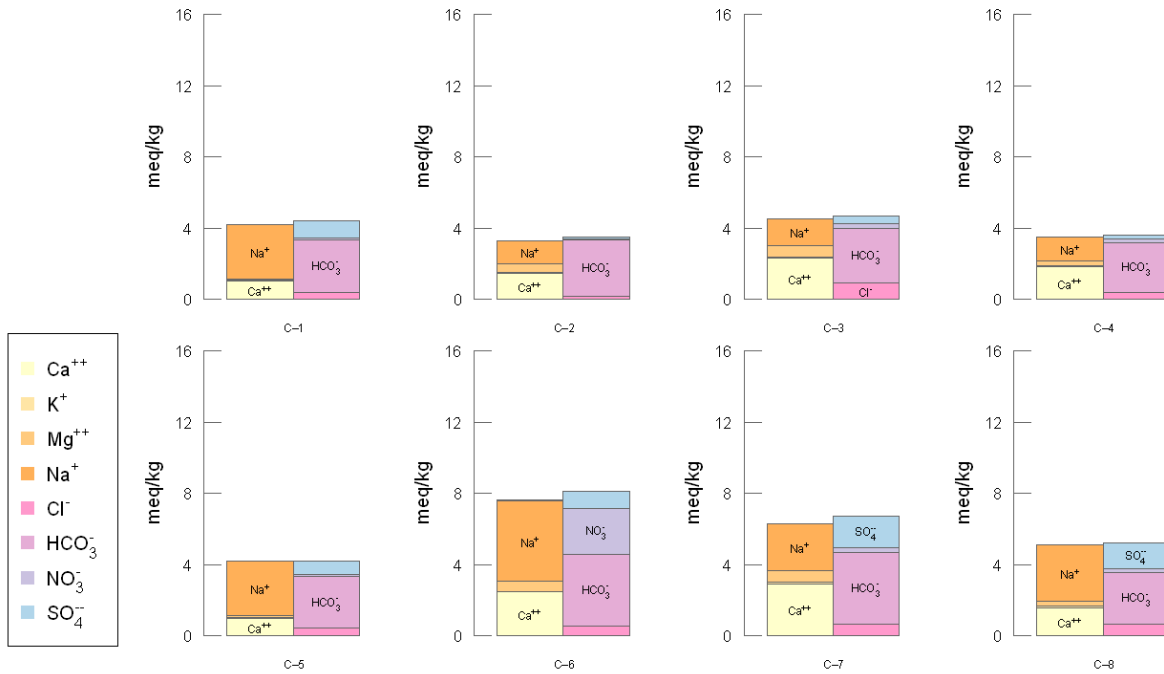


Figura 42. Representación del Diagrama de Collins de las primeras ocho muestras.



6.2 DETERMINACIÓN DE FAMILIAS DE AGUA

6.2.1 Diagramas de Piper

La clasificación de las muestras de acuerdo con su ion dominante se realizó gráficamente mediante el uso del diagrama de Piper, el cual consiste en dos campos triangulares en los que se representan los cationes y los aniones de manera separada, según el porcentaje que constituyen en cada muestra; esto permite la visualización de la tendencia de composición. Los cationes considerados son calcio, magnesio, sodio y potasio; mientras que los aniones son los bicarbonatos, sulfatos, cloruros y nitratos.

Como se puede observar en la Figura 43, se simplificaron los resultados en tres familias: bicarbonatada sódica (25 muestras), bicarbonatada mixta (15 muestras) y bicarbonatada cálcica (23 muestras).

El tipo de aprovechamiento no se redujo exclusivamente a pozos, también fueron muestreadas norias, presas, manantiales y agua de lluvia. En la Tabla 10 se observa el número de muestras correspondientes a cada tipo de aprovechamiento, así como el número de muestras propias de cada familia.

Dentro de las muestras tomadas en pozos (55): 25 (45.45%) pertenecen a la familia Na-HCO₃; 14 (25.45%) a la Mix-HCO₃; y 16 a la Ca-HCO₃ (29.09%).

En el caso de las norias, manantiales y el agua de lluvia, la totalidad de las muestras se clasificaron como bicarbonatadas cálcicas. Mientras que una de las tres muestras tomadas en presas se catalogó como bicarbonatada mixta (33.33%) y el resto bicarbonatadas cálcicas (66.67%).

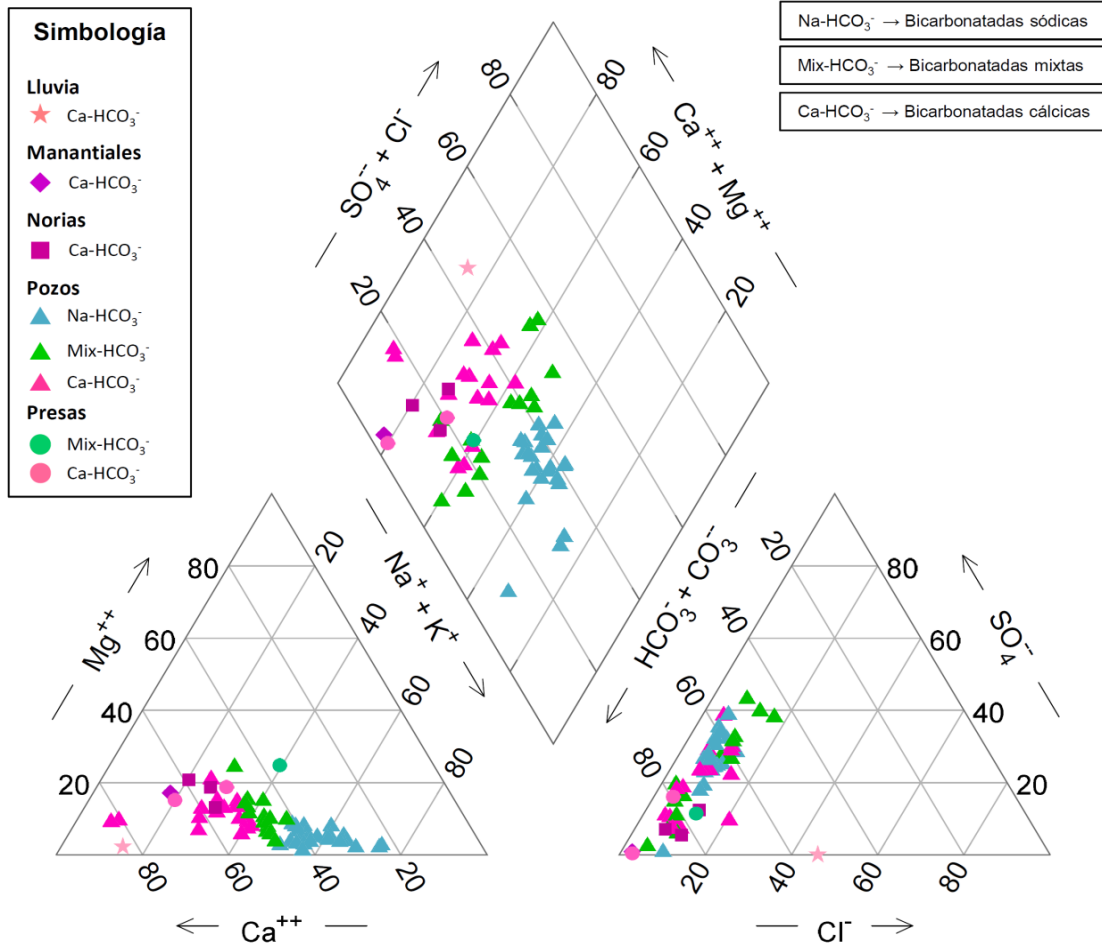


Figura 43. Diagrama de Piper para la determinación de tipos de agua.

Tabla 10. Número de muestras por tipo de aprovechamiento y familia.

Aprovechamiento	<i>n</i>	Familia	<i>n</i>
Pozo	55	Na-HCO ₃	25
		Mix-HCO ₃	14
		Ca-HCO ₃	16
Noria	3	Ca-HCO ₃	3
Presa	3	Mix-HCO ₃	1
		Ca-HCO ₃	2
Manantial	1	Ca-HCO ₃	1
Lluvia	1	Ca-HCO ₃	1



6.2.2 Diagramas de Durov

De una manera similar al diagrama de Piper, el diagrama de Durov permite la visualización del ion dominante en las muestras, incorporando la proyección de los sólidos totales disueltos y el pH. En este caso, la mayoría de las muestras se posicionaron en un rango de sólidos totales disueltos (STD) de 0 a 500 mg/kg, con una sola muestra que sobrepasó los 800 mg/kg (correspondiente a un centro recreativo). En cuanto al pH, se redujo principalmente a un rango de entre 6.5 y 8, siendo solo tres muestras las que sobrepasan este último valor (Figura 44).

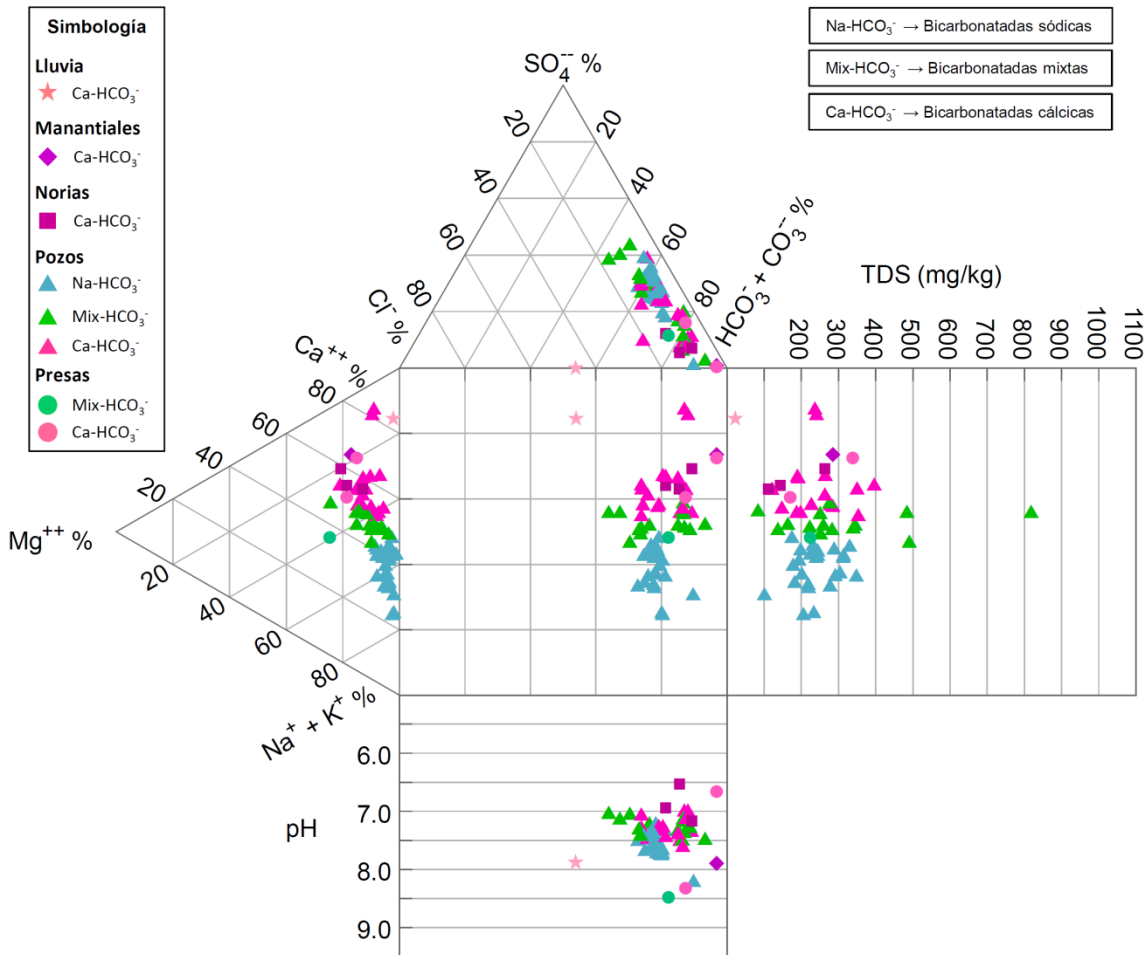


Figura 44. Diagrama de Durov.



6.2.3 *Diagramas de Schöeller*

Este tipo de diagrama de escala logarítmica representa los iones mayores con su respectiva concentración a través de líneas quebradas, en las cuales los picos permiten identificar los iones dominantes. Si bien las muestras que pertenecen a cierta familia varían según ciertos parámetros, de manera global presentaron comportamientos muy similares. Las muestras se representan en las siguientes figuras, donde se agruparon primero por tipo de aprovechamiento y, posteriormente, por familia. En el caso de las tres muestras tomadas en presas, se representaron en un mismo gráfico por ser un número reducido.

En el inciso a, de la Figura 45, se observa las concentraciones de las muestras de pozos de familia bicarbonatada sódica. Los picos indican precisamente lo anterior, un alza en cuanto a las concentraciones del sodio y de los bicarbonatos. En algunos casos, pocas muestras presentan una variación en alguno de los iones como, por ejemplo, potasio y sulfato; y un aumento de nitratos.

Los incisos b y c (familias bicarbonatadas mixtas y cálcicas) son un caso similar al anterior, puesto que todas las muestras siguen un patrón parecido, con algunas variaciones notorias en las concentraciones de cationes y aniones de ciertas muestras.

El inciso d, representa las muestras tomadas en presas, norias, manantiales y lluvia (Figura 46). En las presas se observa claramente el dominio de los bicarbonatos, así como el del calcio. De igual modo, se graficó la muestra de la familia bicarbonatada mixta, en la que las concentraciones de sodio y calcio son similares, con un pico en los bicarbonatos. En el caso de las norias, el cien por ciento de las muestras son bicarbonatadas cálcicas, por lo que existe un dominio de estos iones, observado a través de los picos del diagrama. En las muestras del manantial y el agua de lluvia también se establecen picos en los bicarbonatos y en el calcio.



Pozos

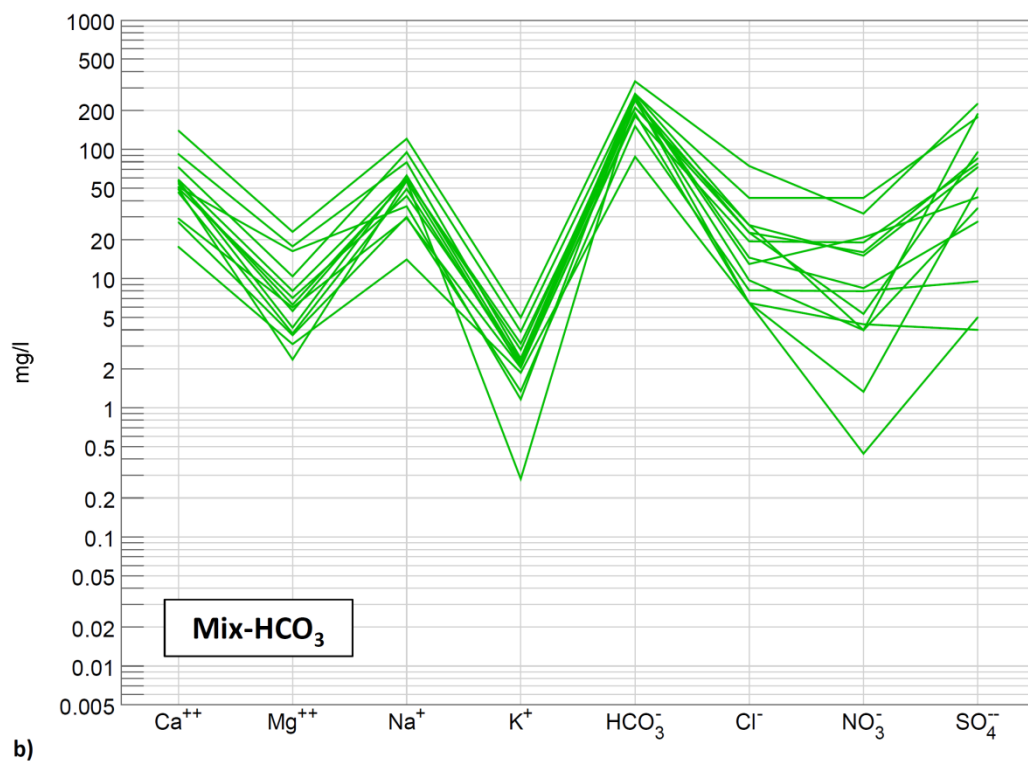
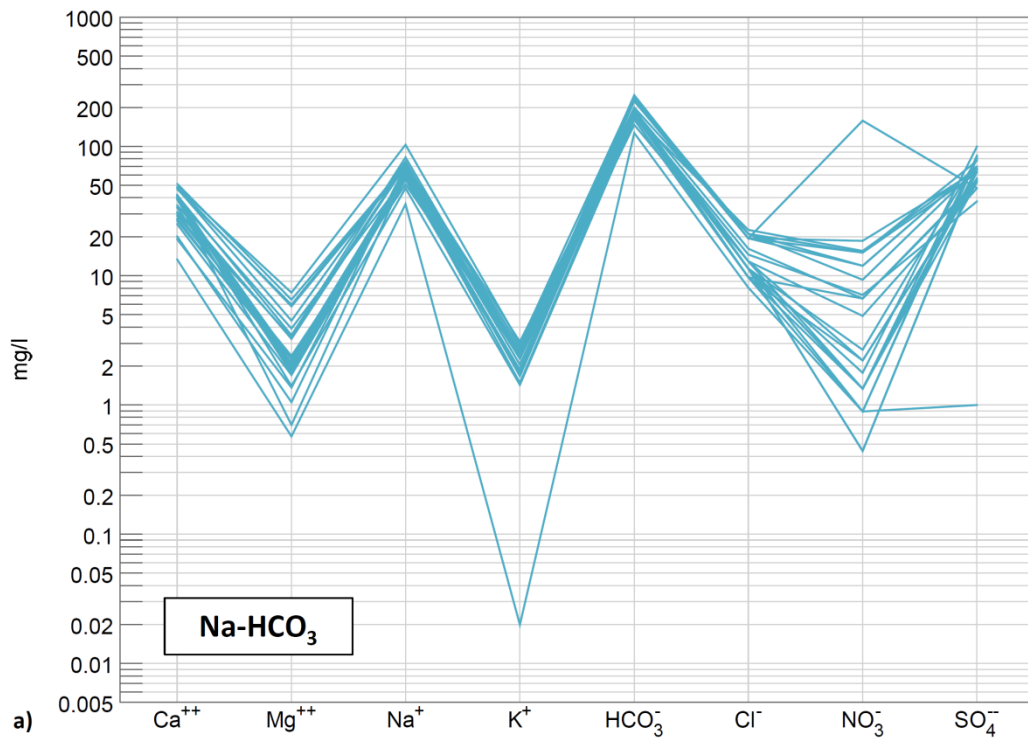
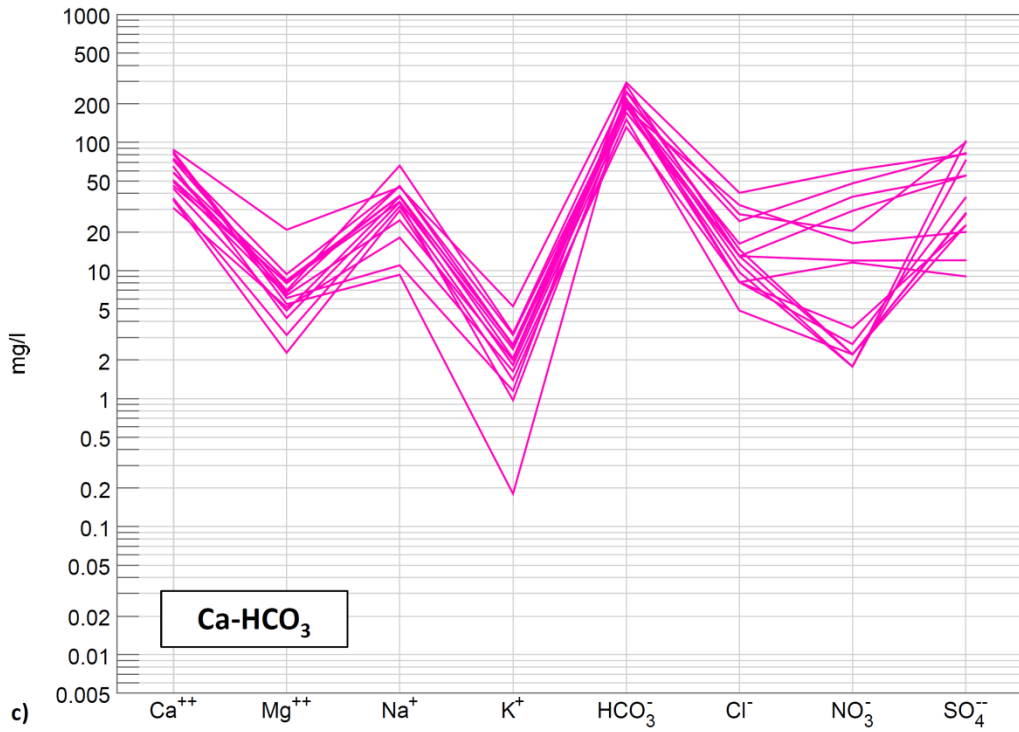


Figura 45. Diagramas de Schöeller de muestras de pozos. Tipo de agua bicarbonatada sódica y mixta.



Pozos



Norias, manantiales, presas y lluvia

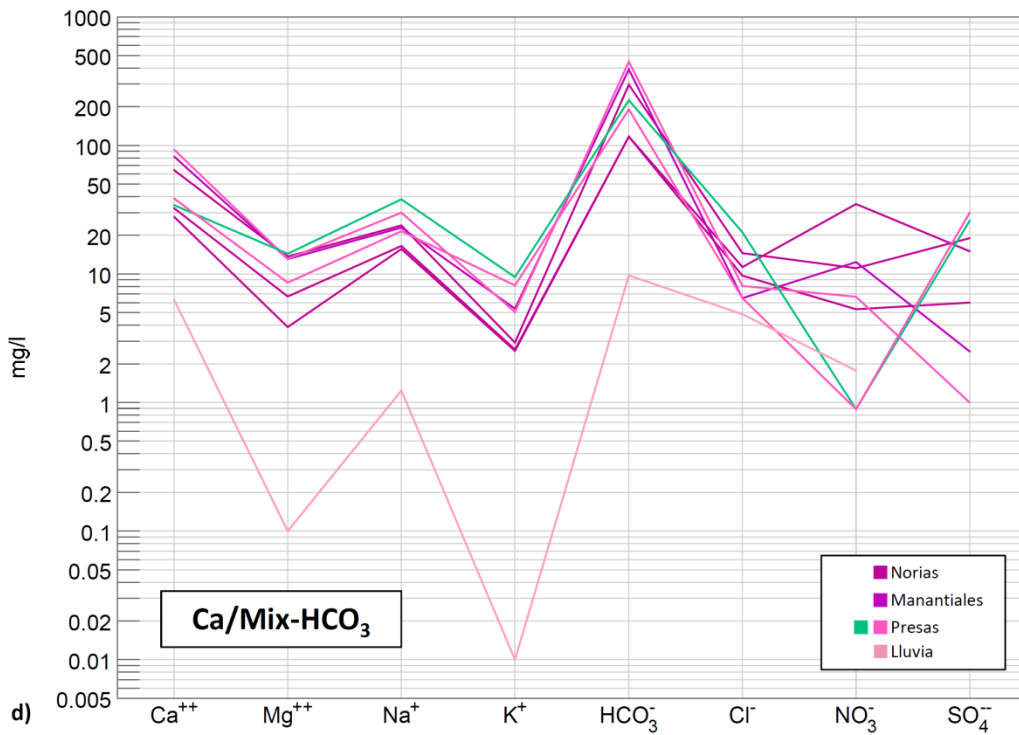


Figura 46. Diagramas de Schöeller de muestras de pozos, norias, manantiales, presas y lluvia. Tipo de agua bicarbonatada mixta y cálcica.



6.2.4 *Diagramas de Stiff*

Este tipo de diagrama ofrece una representación poligonal de la composición química de las soluciones, a partir de las concentraciones de los iones mayores, anteriormente mencionados.

Como se observa en la Figura 47, la familia de agua bicarbonatada sódica se distribuye desde el centro-norte de la ciudad hacia el noroeste, hasta la Colonia Nuevas Delicias; así como al centro-este de la entidad. Si bien dos de las muestras rumbo a El Sauz son bicarbonatadas mixtas, la mayor parte de esta familia se localiza dentro de la ciudad de Chihuahua, al noreste (hacia Aldama) y al suroeste (hacia la carretera a Cuauhtémoc). La familia bicarbonatada cálcica se ubica tanto dentro como a las afueras de la ciudad. El incremento de la concentración iónica es más notorio en los puntos centrales de las zonas urbanas (Chihuahua y Aldama), en las familias bicarbonatadas cálcicas y sódicas.

El agua tipo Na-HCO₃ tiene una correspondencia geológico-estructural importante, pues circula principalmente por rocas extrusivas félsicas y material de relleno como arenas, gravas y conglomerados, y las fallas normales de la región.

El flujo de agua poco profundo-superficial está representado por la familia Ca-HCO₃, cuya interacción principal es con el material de relleno, rocas ígneas félsicas-intermedias (tobas riolíticas, andesitas, secuencias ignimbríticas) y carbonatadas. El tipo Mix-HCO₃ expone una relación con el medio semejante a la familia anterior, está vinculada a material de relleno como arenas-limos, gravas y conglomerados; rocas como riolitas, andesitas, tobas riolíticas y andesíticas, así como calizas.

Los diagramas de Stiff han sido incluidos en el Apéndice III.

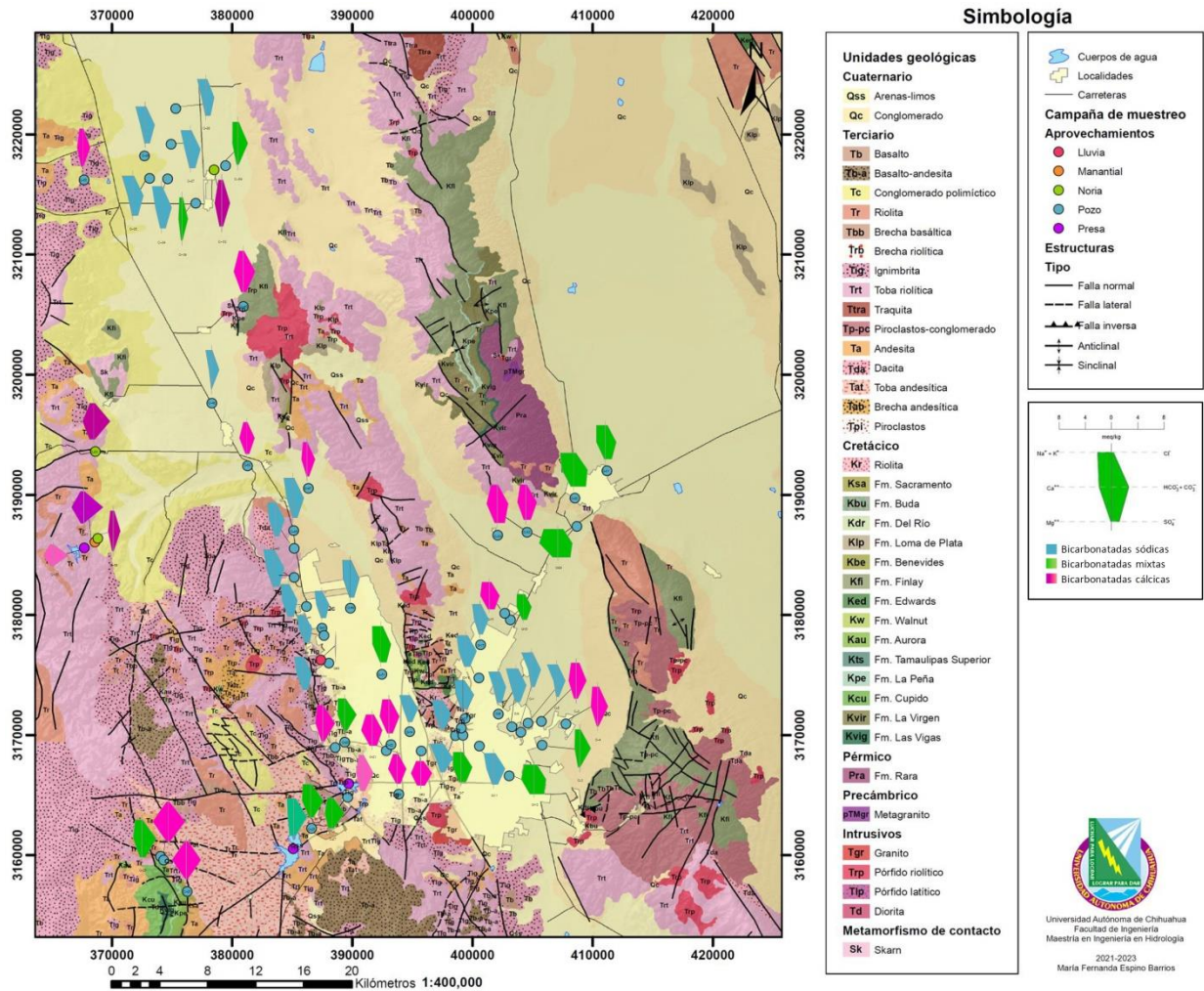


Figura 47. Distribución de los diagramas de Stiff en el área de estudio.

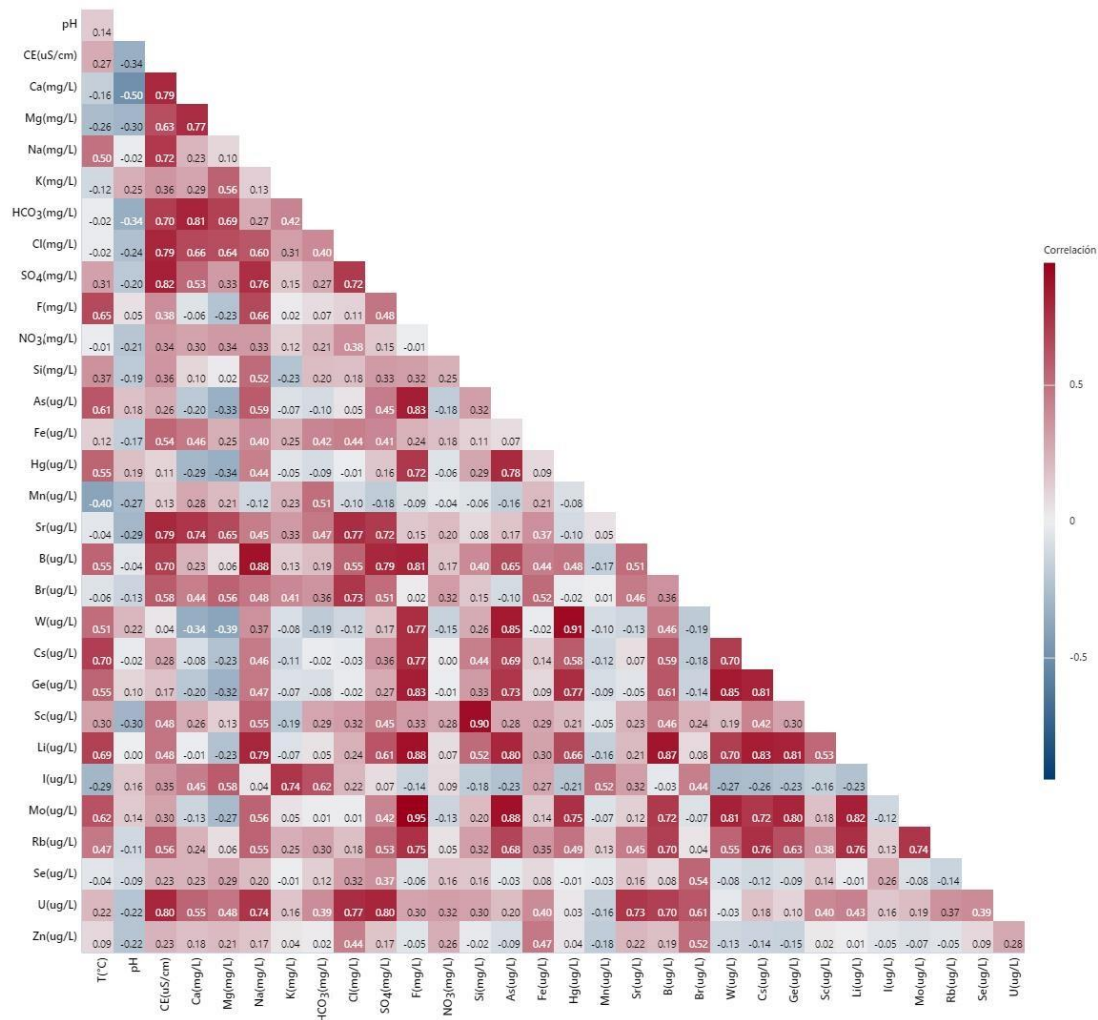


6.3 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN

Con los resultados de iones principales y otros elementos se realizó una matriz de correlación a nivel global (63 puntos muestreados), la cual permite identificar los vínculos de parámetros individuales y reconocer factores que influyen en las altas concentraciones de diversos componentes en el agua.

En la Tabla 11 se resaltaron en rojo oscuro los coeficientes más altos. Dentro de la correlación del fluoruro con diversos parámetros, destacan los siguientes: T °C ($r = 0.65$), Na ($r = 0.66$), Rb ($r = 0.75$), Mo ($r = 0.95$), Li ($r = 0.88$), Cs ($r = 0.77$), W ($r = 0.77$), B ($r = 0.81$), Hg ($r = 0.72$), Ge ($r = 0.83$) y As ($r = 0.83$).

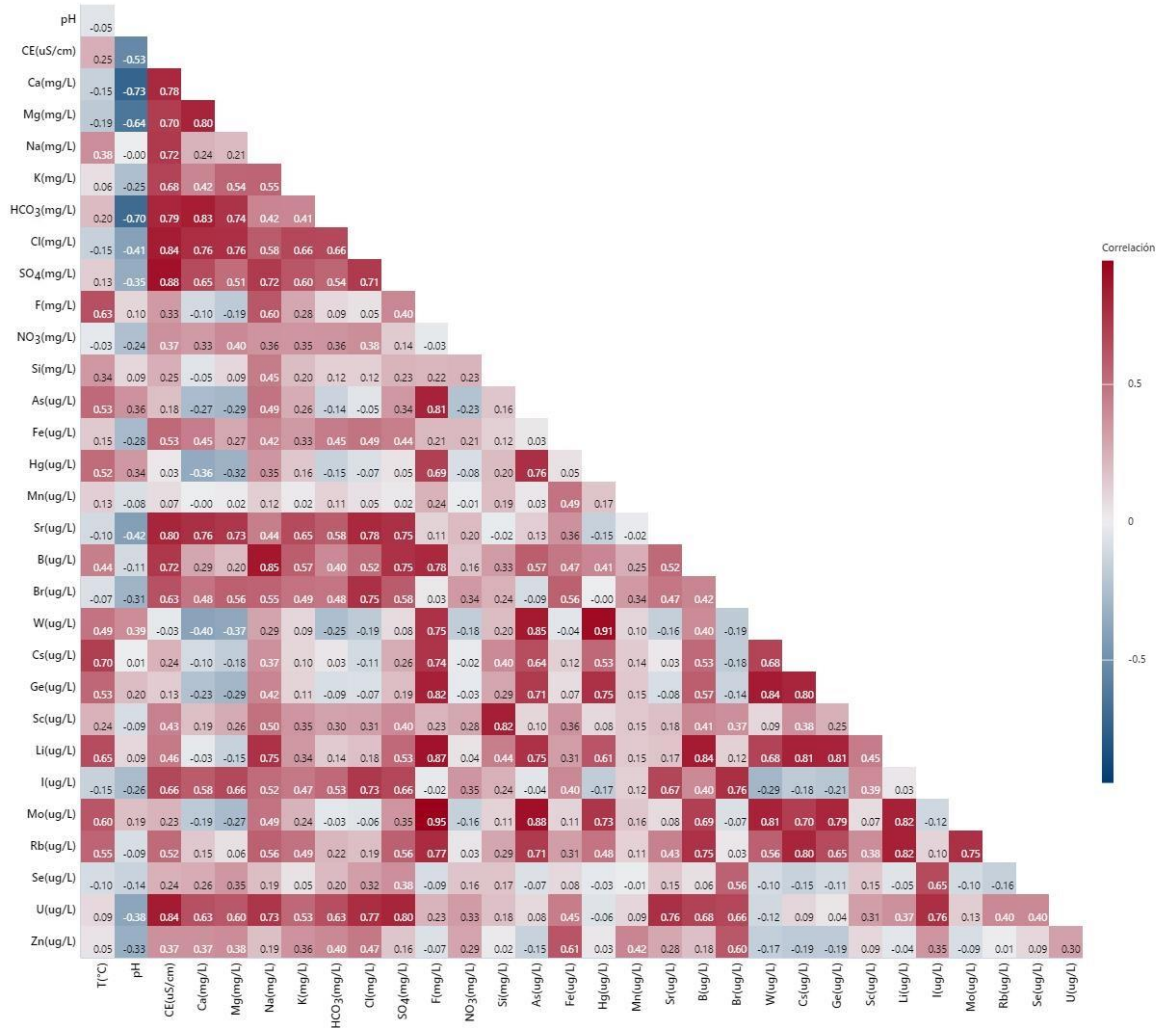
Tabla 11. Coeficientes de correlación de parámetros físico-químicos. Análisis global.





Del mismo modo, se evaluó los coeficientes de correlación entre los resultados exclusivos de pozos (55 puntos), como se muestra en la Tabla 12. El fluoruro presentó mayor relación con parámetros como la temperatura ($r = 0.63$), Na ($r = 0.60$), As ($r = 0.81$), Hg ($r = 0.69$), B ($r = 0.78$), W ($r = 0.75$), Cs ($r = 0.74$), Ge ($r = 0.82$), Li ($r = 0.87$), Mo ($r = 0.95$) y Rb ($r = 0.77$).

Tabla 12. Coeficientes de correlación de parámetros físico-químicos. Análisis de pozos.





6.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO POR FAMILIA DE AGUA

Los resultados de campo y de laboratorio fueron objeto de un análisis estadístico por familia y por aprovechamiento-familia, como se muestra a continuación. El análisis consistió en la identificación del valor máximo, valor mínimo, media y desviación estándar de algunos de los parámetros más relevantes.

En ciertos casos, las concentraciones de algunos parámetros se encontraron por debajo del límite de detección ($\text{ug/L} = \mu\text{g/L}$). Para fines prácticos, en estos casos se tomó en cuenta la concentración como la mitad del límite de detección, por ejemplo, “ <0.01 ” se ingresó como “0.005”.

En la Tabla 13, se observa que los valores promedio de la temperatura, pH, fluoruro, silicio, arsénico, mercurio, boro, wolframio, cesio, germanio, escandio, litio, molibdeno y rubidio resaltan en la familia bicarbonatada sódica. Por lo que la mayoría de éstos tienen una correlación fuerte con el ion fluoruro, como se observó anteriormente.

La conductividad eléctrica, magnesio, potasio, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, hierro, estroncio, bromo, yodo, selenio y uranio resaltan en la familia bicarbonatada mixta. Mientras que el manganeso, nitratos y zinc en la familia bicarbonatada cálcica.



Tabla 13. Análisis estadístico descriptivo por familia de agua.

Estadística descriptiva por familia						
Variable	Familia	N	Media	Desv.Est.	Mínimo	Máximo
T(°C)	Ca	23	23.10	3.33	13.70	28.20
	Mix	15	25.31	3.83	19.50	32.60
	Na	25	28.14	2.90	23.00	33.90
pH	Ca	23	7.33	0.39	6.53	8.33
	Mix	15	7.37	0.34	7.05	8.49
	Na	25	7.55	0.21	7.23	8.22
CE(uS/cm)	Ca	23	471.90	186.10	47.70	837.00
	Mix	15	623.00	324.80	160.40	1450.00
	Na	25	528.00	119.20	217.70	747.00
Ca(mg/L)	Ca	23	54.99	22.52	6.30	92.91
	Mix	15	55.49	29.59	17.60	139.75
	Na	25	35.92	10.06	13.37	51.40
Mg(mg/L)	Ca	23	7.38	4.45	0.10	20.76
	Mix	15	8.78	6.25	2.36	22.98
	Na	25	2.86	1.85	0.57	7.37
Na(mg/L)	Ca	23	28.88	14.38	1.24	65.66
	Mix	15	55.45	27.17	14.03	120.57
	Na	25	64.39	12.85	35.76	102.88
K(mg/L)	Ca	23	2.70	1.82	0.01	8.14
	Mix	15	2.81	2.16	0.28	9.48
	Na	25	2.16	0.62	0.02	3.09
HCO ₃ (mg/L)	Ca	23	211.50	91.50	9.80	449.00
	Mix	15	224.80	58.10	87.80	336.70
	Na	25	188.95	30.53	126.88	248.88
Cl(mg/L)	Ca	23	13.71	9.09	4.85	40.42
	Mix	15	21.23	17.69	6.47	74.37
	Na	25	14.36	4.58	8.08	22.63
SO ₄ (mg/L)	Ca	23	36.74	31.79	0.00	102.50
	Mix	15	74.60	69.90	4.00	225.00
	Na	25	63.10	18.93	1.00	100.00
F(mg/L)	Ca	23	0.99	0.87	0.14	3.34
	Mix	15	1.50	0.97	0.48	3.54
	Na	25	3.00	1.17	0.30	4.99
NO ₃ (mg/L)	Ca	23	14.70	16.53	0.89	60.65
	Mix	15	12.10	12.19	0.44	42.05
	Na	25	11.95	31.06	0.44	158.48
Si(mg/L)	Ca	23	9.61	5.39	0.25	18.50
	Mix	15	10.98	4.42	0.25	17.28
	Na	25	13.41	2.20	8.64	17.28
As(ug/L)	Ca	23	12.21	12.35	0.05	40.44
	Mix	15	18.54	11.93	4.45	46.53
	Na	25	37.30	14.30	18.68	71.87
Fe(ug/L)	Ca	23	27.43	18.32	5.60	87.53
	Mix	15	31.07	14.49	9.90	64.43
	Na	25	29.79	16.74	11.54	89.24
Hg(ug/L)	Ca	23	0.17	0.06	0.11	0.33
	Mix	15	0.20	0.07	0.11	0.36
	Na	25	0.36	0.15	0.12	0.71
Mn(ug/L)	Ca	23	641.00	2775.00	0.01	13295.00
	Mix	15	0.46	1.76	0.01	6.82
	Na	25	0.02	0.10	0.01	0.48
Sr(ug/L)	Ca	23	697.00	481.00	19.00	1618.00
	Mix	15	961.00	1108.00	148.00	4563.00
	Na	25	445.80	150.60	177.70	751.40
B(ug/L)	Ca	23	71.60	69.80	0.01	273.10
	Mix	15	192.50	164.10	28.40	573.30
	Na	25	238.70	77.00	50.90	406.40
Br(ug/L)	Ca	23	86.20	49.50	9.60	182.80
	Mix	15	143.50	130.50	34.30	489.40
	Na	25	95.40	96.60	28.70	404.00
W(ug/L)	Ca	23	0.28	0.48	0.01	1.92
	Mix	15	0.59	0.70	0.01	1.97
	Na	25	4.12	3.17	0.47	11.78
Cs(ug/L)	Ca	23	1.17	1.73	0.01	5.09
	Mix	15	2.68	2.89	0.01	7.65
	Na	25	6.01	4.50	0.01	14.38
Ge(ug/L)	Ca	23	0.03	0.12	0.01	0.60
	Mix	15	0.13	0.20	0.01	0.68
	Na	25	0.79	0.61	0.01	1.87
Sc(ug/L)	Ca	23	2.82	1.56	0.01	5.36
	Mix	15	3.30	1.20	0.01	4.87
	Na	25	3.62	0.60	2.41	4.51
Li(ug/L)	Ca	23	31.55	28.71	0.01	98.70
	Mix	15	78.30	56.60	3.00	168.90
	Na	25	137.32	44.31	18.96	198.30
I(ug/L)	Ca	23	53.40	55.50	10.40	223.30
	Mix	15	54.80	47.00	12.90	177.60
	Na	25	30.12	10.23	17.50	53.72
Mo(ug/L)	Ca	23	1.48	2.02	0.01	6.87
	Mix	15	2.34	2.39	0.01	8.10
	Na	25	6.00	2.57	0.01	11.37
Rb(ug/L)	Ca	23	9.43	6.33	0.01	19.41
	Mix	15	11.40	9.41	1.07	28.42
	Na	25	15.09	6.40	0.51	26.39
Se(ug/L)	Ca	23	1.95	1.37	0.01	5.69
	Mix	15	25.70	88.00	0.40	343.80
	Na	25	4.92	11.48	0.47	57.48
U(ug/L)	Ca	23	4.28	3.25	0.01	12.32
	Mix	15	11.60	9.94	0.01	36.63
	Na	25	7.21	3.16	3.68	15.56
Zn(ug/L)	Ca	23	21.87	15.01	0.34	50.55
	Mix	15	20.94	11.85	3.02	53.51
	Na	25	20.13	16.57	3.71	66.33



6.4.1 Diagrama de cajas y bigotes

Los diagramas de cajas y bigotes permiten el análisis de un gran número de datos de manera resumida, es decir, no trabaja los datos individualmente. Éstos se agrupan en cuatro secciones (cuartiles) donde cada grupo posee el 25% de los datos. El diagrama también presenta los valores atípicos que existan en el conjunto de valores.

En la Figura 48 se muestra como el diagrama se compone del valor máximo y mínimo, donde la diferencia entre ambos valores indica el rango. El límite inferior y superior de la caja, representa el primer y tercer cuartil, respectivamente. El Q_1 agrupa el 25% de los datos; el Q_2 o mediana, es el valor central del conjunto y constituye el 50% de los datos; de esta manera, el Q_3 concentra el 75%. La amplitud de la caja, hacia Q_1 y Q_3 , indica lo espaciados que están los valores en esas direcciones. Otro rango importante, es el intercuartil (Q_3-Q_1) lo que significa que reúne el 50% de los datos (75%-25%).

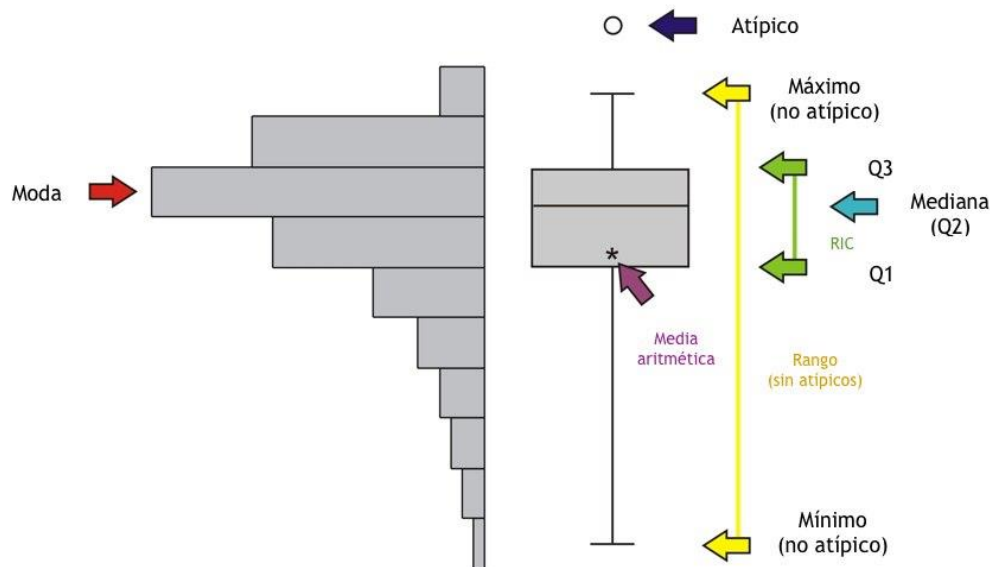


Figura 48. Diagrama de caja (Wikipedia, 2021).

Este tipo de diagrama se aplicó a los cationes y aniones mayores, temperatura y pH (Figura 49). La totalidad de los diagramas se muestra en el Apéndice IV.

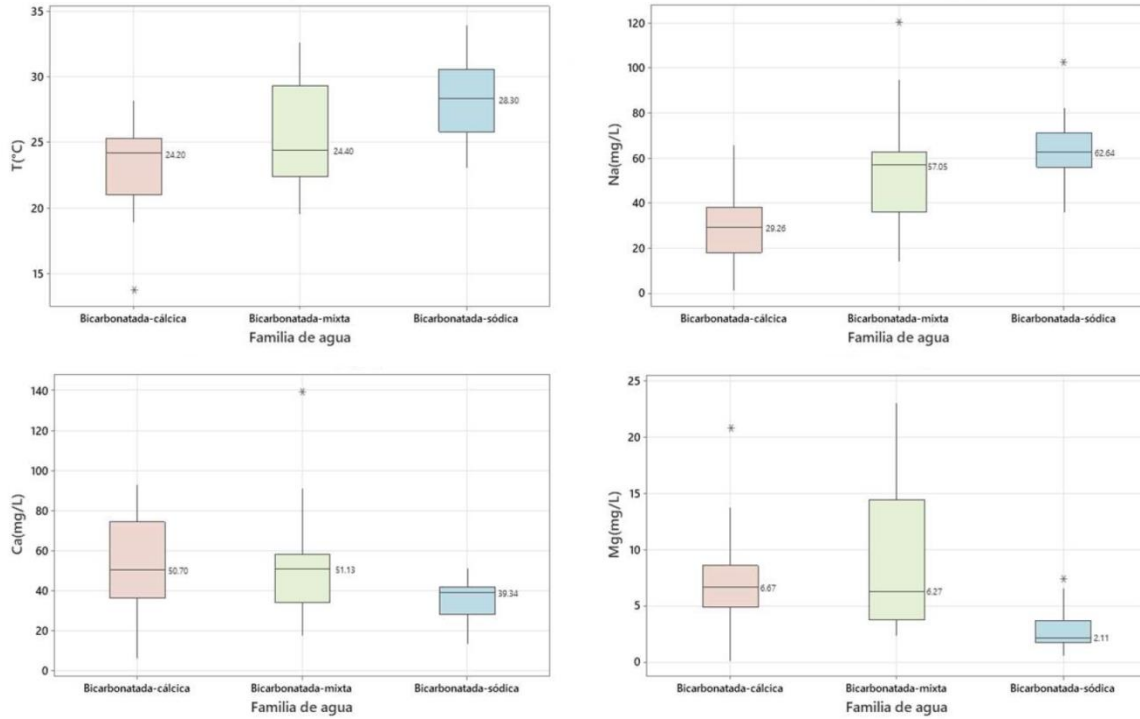


Figura 49. Diagramas de cajas de parámetros físico-químicos. Análisis por familia.

El gráfico de la temperatura prueba la relación entre ésta y la familia bicarbonatada sódica, ya que las mayores temperaturas se presentaron en ese conjunto de datos. La temperatura disminuye hacia el grupo bicarbonatado mixto y cálcico, respectivamente.

Las familias reflejaron un comportamiento similar entre ellas en cuanto a parámetros como el pH, potasio, bicarbonatos, nitratos, cloruros y sulfatos. Si bien presentaron distintos rangos intercuartiles, éstos permanecieron en un rango de concentraciones cercano.

En cambio, el sodio, calcio y magnesio exhibieron mayor variabilidad. Así pues, fue posible relacionarlo con la familia de agua. La concentración del sodio y el calcio aumentó o disminuyó en las familias según lo esperado (correlación negativa); mientras que la concentración de magnesio sobresalió en la familia mixta.



6.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO POR APROVECHAMIENTO Y FAMILIA DE AGUA

Una situación semejante a la anterior se muestra a continuación. Los puntos muestreados fueron divididos en dos grupos. El grupo I se refiere a información exclusivamente de pozos (55), mientras que el grupo II reúne la información de las norias (3), manantiales (1), presas (3) y lluvia (1).

Para ambos grupos, el análisis consistió en la evaluación estadística por familia. Por lo anterior, el comportamiento de los parámetros tiende a ser similar. La media de la temperatura del grupo I (Tabla 14) destaca en la familia bicarbonatada sódica, así como el pH, F, Si, As, Hg, B, W, Cs, Ge, Sc, Li, Mo y Rb. En este caso, a diferencia del análisis por familia, el Mn resalta en este mismo grupo.

El valor promedio de la conductividad eléctrica, Mg, K, HCO₃, Cl, SO₄, Fe, Sr, Br, I, Se y U sobresale en la familia bicarbonatada mixta. Mientras que en la familia bicarbonatada cálcica se resalta el zinc y los nitratos.

En el grupo II (Tabla 15) se observa que la familia bicarbonatada mixta solo tiene un punto del que provienen los datos, por lo que son valores únicos. Una comparación entre ambos grupos, dentro de la familia bicarbonatada cálcica, mostró que el valor medio de pH, Mg, K, HCO₃, Mn, Br, I y Rb es mayor en el grupo II.



Tabla 14. Análisis estadístico del grupo I.

Estadística descriptiva por familia-aprovechamiento													
Resultados de Grupo I (Pozos)													
Variable	Familia	N	Media	Desv.Est.	Mínimo	Máximo	Variable	Familia	N	Media	Desv.Est.	Mínimo	Máximo
T(°C)	Ca	16	24.43	2.30	19.60	28.20	Mn(ug/L)	Ca	16	0.01	0.00	0.01	0.01
	Mix	14	25.38	3.96	19.50	32.60		Mix	14	0.01	0.00	0.01	0.01
	Na	25	28.14	2.90	23.00	33.90		Na	25	0.02	0.10	0.01	0.48
pH	Ca	16	7.32	0.18	7.01	7.62	Sr(ug/L)	Ca	16	794.00	515.00	179.00	1618.00
	Mix	14	7.29	0.15	7.05	7.51		Mix	14	1002.00	1138.00	148.00	4563.00
	Na	25	7.55	0.21	7.23	8.22		Na	25	445.80	150.60	177.70	751.40
CE(us/cm)	Ca	16	505.00	155.50	245.60	837.00	B(ug/L)	Ca	16	94.60	71.20	18.30	273.10
	Mix	14	633.20	334.50	160.40	1450.00		Mix	14	200.10	167.50	28.40	573.30
	Na	25	528.00	119.20	217.70	747.00		Na	25	238.70	77.00	50.90	406.40
Ca(mg/L)	Ca	16	57.52	18.13	30.70	87.48	Br(ug/L)	Ca	16	79.90	52.40	21.70	182.80
	Mix	14	57.00	30.09	17.60	139.75		Mix	14	138.30	133.70	34.30	489.40
	Na	25	35.92	10.06	13.37	51.40		Na	25	95.40	96.60	28.70	404.00
Mg(mg/L)	Ca	16	6.92	4.16	2.27	20.76	W(ug/L)	Ca	16	0.40	0.54	0.01	1.92
	Mix	14	8.38	6.28	2.36	22.98		Mix	14	0.63	0.71	0.01	1.97
	Na	25	2.86	1.85	0.57	7.37		Na	25	4.12	3.17	0.47	11.78
Na(mg/L)	Ca	16	33.28	14.22	9.25	65.66	Cs(ug/L)	Ca	16	1.67	1.86	0.01	5.09
	Mix	14	56.69	27.75	14.03	120.57		Mix	14	2.87	2.90	0.01	7.65
	Na	25	64.39	12.85	35.76	102.88		Na	25	6.01	4.50	0.01	14.38
K(mg/L)	Ca	16	2.21	1.14	0.18	5.23	Ge(ug/L)	Ca	16	0.04	0.15	0.01	0.60
	Mix	14	2.33	1.16	0.28	4.99		Mix	14	0.14	0.21	0.01	0.68
	Na	25	2.16	0.62	0.02	3.09		Na	25	0.79	0.61	0.01	1.87
HCO ₃ (mg/L)	Ca	16	205.90	44.00	131.80	292.80	Se(ug/L)	Ca	16	3.18	1.41	0.68	5.36
	Mix	14	224.80	60.30	87.80	336.70		Mix	14	3.54	0.81	2.46	4.87
	Na	25	188.95	30.53	126.88	248.88		Na	25	3.62	0.60	2.41	4.51
Cl(mg/L)	Ca	16	15.86	10.02	4.85	40.42	Li(ug/L)	Ca	16	41.66	28.84	7.45	98.70
	Mix	14	21.25	18.35	6.47	74.37		Mix	14	83.70	54.70	8.50	168.90
	Na	25	14.36	4.58	8.08	22.63		Na	25	137.32	44.31	18.96	198.30
SO ₄ (mg/L)	Ca	16	48.22	31.14	9.00	102.50	I(ug/L)	Ca	16	35.98	15.71	10.36	61.66
	Mix	14	78.10	71.10	4.00	225.00		Mix	14	46.00	33.69	12.87	132.35
	Na	25	63.10	18.93	1.00	100.00		Na	25	30.12	10.23	17.50	53.72
F(mg/L)	Ca	16	1.14	0.99	0.14	3.34	Mo(ug/L)	Ca	16	1.73	2.28	0.01	6.87
	Mix	14	1.55	0.99	0.48	3.54		Mix	14	2.32	2.48	0.01	8.10
	Na	25	3.00	1.17	0.30	4.99		Na	25	6.00	2.57	0.01	11.37
NO ₃ (mg/L)	Ca	16	16.57	18.28	1.77	60.65	Rb(ug/L)	Ca	16	9.32	6.15	2.23	19.41
	Mix	14	12.90	12.23	0.44	42.05		Mix	14	11.79	9.64	1.07	28.42
	Na	25	11.95	31.06	0.44	158.48		Na	25	15.09	6.40	0.51	26.39
Si(mg/L)	Ca	16	10.67	5.06	0.79	18.50	Se(ug/L)	Ca	16	2.45	1.29	0.66	5.69
	Mix	14	11.75	3.39	6.12	17.28		Mix	14	27.30	91.10	0.40	343.80
	Na	25	13.41	2.20	8.64	17.28		Na	25	4.92	11.48	0.47	57.48
As(ug/L)	Ca	16	15.82	13.24	3.68	40.44	U(ug/L)	Ca	16	5.10	2.29	1.53	11.49
	Mix	14	19.55	11.71	4.46	46.53		Mix	14	12.04	10.17	0.01	36.63
	Na	25	37.30	14.30	18.68	71.87		Na	25	7.21	3.16	3.68	15.56
Fe(ug/L)	Ca	16	27.94	18.90	5.60	87.53	Zn(ug/L)	Ca	16	24.26	14.36	0.34	50.55
	Mix	14	31.83	14.72	9.90	64.43		Mix	14	20.69	12.26	3.02	53.51
	Na	25	29.79	16.74	11.54	89.24		Na	25	20.13	16.57	3.71	66.33
Hg(ug/L)	Ca	16	0.18	0.06	0.11	0.33							
	Mix	14	0.20	0.07	0.11	0.36							
	Na	25	0.36	0.15	0.12	0.71							



Tabla 15. Análisis estadístico del grupo II.

Estadística descriptiva por familia-aprovechamiento							Resultados de Grupo II (Presas, norias, manantiales, lluvia)						
Variable	Familia	N	Media	Desv.Est.	Mínimo	Máximo	Variable	Familia	N	Media	Desv.Est.	Mínimo	Máximo
T(°C)	Ca	7	20.09	3.49	13.70	24.60	Mn(ug/L)	Ca	7	2106.00	4963.00	0.01	13295.00
	Mix	1	24.40	*	24.40	24.40		Mix	1	6.82	*	6.82	6.82
pH	Ca	7	7.35	0.69	6.53	8.33	Sr(ug/L)	Ca	7	476.00	321.00	19.00	898.00
	Mix	1	8.49	*	8.49	8.49		Mix	1	397.95	*	397.95	397.95
CE(uS/cm)	Ca	7	396.30	238.60	47.70	730.00	B(ug/L)	Ca	7	19.06	23.32	0.01	68.22
	Mix	1	479.90	*	479.90	479.90		Mix	1	87.08	*	87.08	87.08
Ca(mg/L)	Ca	7	49.20	31.30	6.30	92.90	Br(ug/L)	Ca	7	100.50	42.30	9.60	137.20
	Mix	1	34.29	*	34.29	34.29		Mix	1	216.35	*	216.35	216.35
Mg(mg/L)	Ca	7	8.44	5.24	0.10	13.70	W(ug/L)	Ca	7	0.01	0.00	0.01	0.01
	Mix	1	14.38	*	14.38	14.38		Mix	1	0.01	*	0.01	0.01
Na(mg/L)	Ca	7	18.83	9.13	1.24	30.03	Cs(ug/L)	Ca	7	0.01	0.00	0.01	0.01
	Mix	1	38.04	*	38.04	38.04		Mix	1	0.01	*	0.01	0.01
K(mg/L)	Ca	7	3.80	2.62	0.01	8.14	Ge(ug/L)	Ca	7	0.01	0.00	0.01	0.01
	Mix	1	9.48	*	9.48	9.48		Mix	1	0.01	*	0.01	0.01
HCO ₃ (mg/L)	Ca	7	224.50	160.00	9.80	449.00	Sc(ug/L)	Ca	7	1.99	1.68	0.01	4.65
	Mix	1	224.48	*	224.48	224.48		Mix	1	0.01	*	0.01	0.01
Cl(mg/L)	Ca	7	8.78	3.35	4.85	14.55	Li(ug/L)	Ca	7	8.43	6.79	0.01	14.42
	Mix	1	21.02	*	21.02	21.02		Mix	1	2.99	*	2.99	2.99
SO ₄ (mg/L)	Ca	7	10.50	11.24	0.00	30.00	I(ug/L)	Ca	7	93.10	89.60	12.30	223.30
	Mix	1	26.00	*	26.00	26.00		Mix	1	177.60	*	177.60	177.60
F(mg/L)	Ca	7	0.65	0.37	0.24	1.08	Mo(ug/L)	Ca	7	0.89	1.17	0.01	2.81
	Mix	1	0.83	*	0.83	0.83		Mix	1	2.59	*	2.59	2.59
NO ₃ (mg/L)	Ca	7	10.43	11.64	0.89	34.97	Rb(ug/L)	Ca	7	9.68	7.21	0.01	19.16
	Mix	1	0.89	*	0.89	0.89		Mix	1	5.94	*	5.94	5.94
Si(mg/L)	Ca	7	7.19	5.74	0.25	15.86	Se(ug/L)	Ca	7	0.79	0.65	0.01	1.87
	Mix	1	0.25	*	0.25	0.25		Mix	1	2.25	*	2.25	2.25
As(ug/L)	Ca	7	3.95	2.64	0.05	7.67	U(ug/L)	Ca	7	2.40	4.44	0.01	12.31
	Mix	1	4.45	*	4.45	4.45		Mix	1	5.53	*	5.53	5.53
Fe(ug/L)	Ca	7	26.27	18.32	11.10	56.84	Zn(ug/L)	Ca	7	16.41	16.12	0.37	39.25
	Mix	1	20.42	*	20.42	20.42		Mix	1	24.44	*	24.44	24.44
Hg(ug/L)	Ca	7	0.14	0.02	0.12	0.17							
	Mix	1	0.14	*	0.14	0.14							



6.5.1 Diagrama de cajas y bigotes

La evaluación de los datos por medio del diagrama de cajas y bigotes se realizó a partir de la división en grupos según el aprovechamiento (Figura 50). Su comportamiento fue equiparable a la descripción realizada anteriormente por familia. Sin embargo, la agrupación permitió identificar que las máximas concentraciones de calcio y valores máximos de pH pertenecen a aprovechamientos de agua más somera, por lo que la concentración de sodio disminuye considerablemente en estos puntos, mientras que el rango de temperatura disminuyó de forma menos marcada. El resto de los diagramas se encuentran en el Apéndice IV.

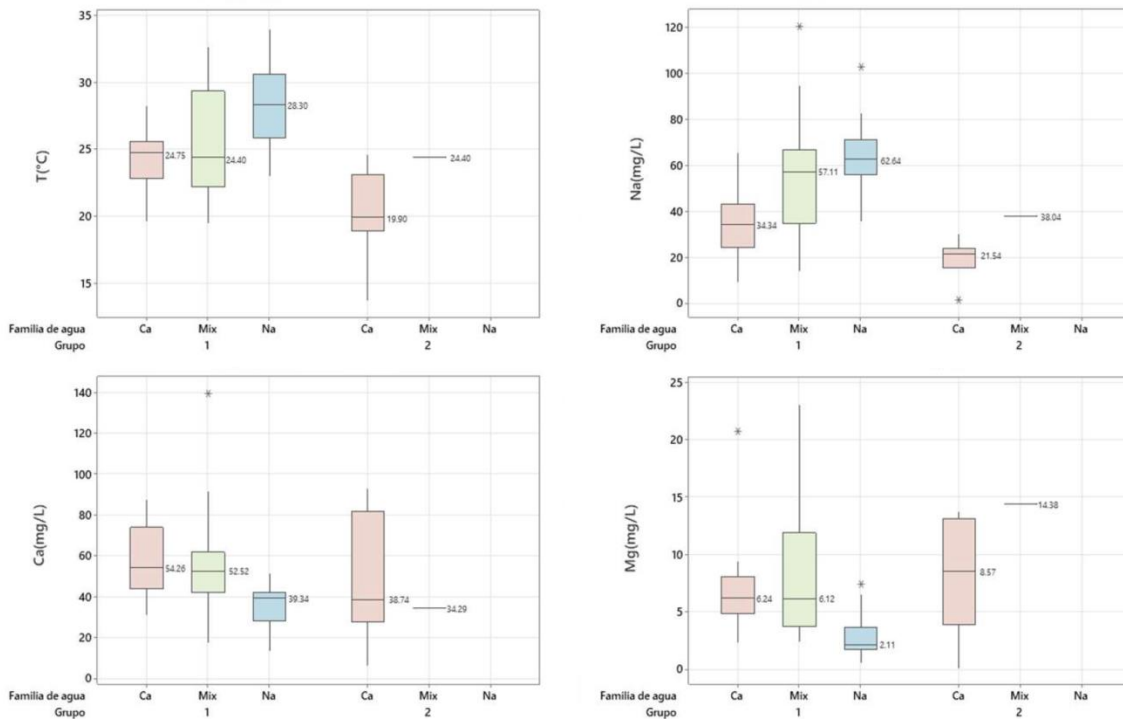


Figura 50. Diagramas de cajas de parámetros físico-químicos. Análisis por grupo y familia.



6.6 CALIDAD DEL AGUA CON RESPECTO AL USO Y CONSUMO HUMANO

La calidad del agua para uso y consumo humano se establece a través de una evaluación de las características físicas y químicas del líquido. La Norma Oficial Mexicana 127 (modificación del año 2000) establece los límites máximos permisibles (mg/L) de diversos constituyentes químicos.

Si bien un pequeño porcentaje de los puntos muestreados no están destinados para el abastecimiento (uso recreativo, agrícola, agropecuario y ecológico), se realizó la valoración de la calidad del total de las muestras. Fue necesaria la conversión de los resultados de laboratorio reportados en $\mu\text{g/L}$ para su evaluación.

En la Tabla 16 se enlistan los límites permisibles de los componentes químicos. Los parámetros resaltados en negritas son aquellos cuyos valores excedieron los límites señalados.

Tabla 16. Límites máximos permisibles de calidad del agua. Constituyentes químicos (Secretaría de Salud, 2000).

Parámetro	Límite	Parámetro	Límite
Aluminio	0.20 mg/L	Manganeso	0.15 mg/L
Arsénico	0.025 mg/L	Mercurio	0.001 mg/L
Bario	0.70 mg/L	Nitratos (-N)	10.00 mg/L
Cadmio	0.005 mg/L	pH	6.5-8.5 unidades de pH
Cloruros	250.00 mg/L	Plomo	0.01 mg/L
Cobre	2.00 mg/L	Sodio	200.00 mg/L
Cromo total	0.05 mg/L	SDT	1000.00 mg/L
Dureza total	500.00 mg/L	Sulfatos	400.00 mg/L
Fierro	0.30 mg/L	Zinc	5.00 mg/L
Fluoruro	1.50 mg/L		



De las 63 muestras recolectadas, 27 de ellas sobrepasan el límite permisible del arsénico de 0.025 mg/L y poco más del 50% exponen concentraciones mayores a 1.5 mg/L de fluoruro. Mientras que constituyentes como el bario, el manganeso y los nitratos como nitrógeno tienen menos del 5% de excedentes (Tabla 17).

Tabla 17. Número y porcentaje de muestras fuera de la norma.

Parámetro	No. Excedentes	%
Arsénico	27	42.86
Bario	3	4.76
Fluoruro	32	50.79
Manganeso	2	3.17
Nitratos (-N)	3	4.76

6.6.1 Diagrama de Wilcox

Otra manera de evaluar la composición del agua es a través del diagrama de Wilcox, un diagrama enfocado a la clasificación para riego. Del mismo modo, todas las muestras fueron sometidas a esta valoración.

El diagrama vincula la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y el porcentaje de sodio. Para la estimación de este porcentaje se requiere la concentración de sodio, además del potasio, calcio y magnesio, todos en miliequivalente por litro.

$$\% \text{ Na} = 100 \times \frac{(\text{Na} + \text{K})}{(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K})} \quad (2)$$

Tal como se muestra en el diagrama de la Figura 51, más del 90% de las muestras se encuentra bajo la clasificación “excelente”, mientras que 4 de las 63 muestras se clasifican como “buenas”.

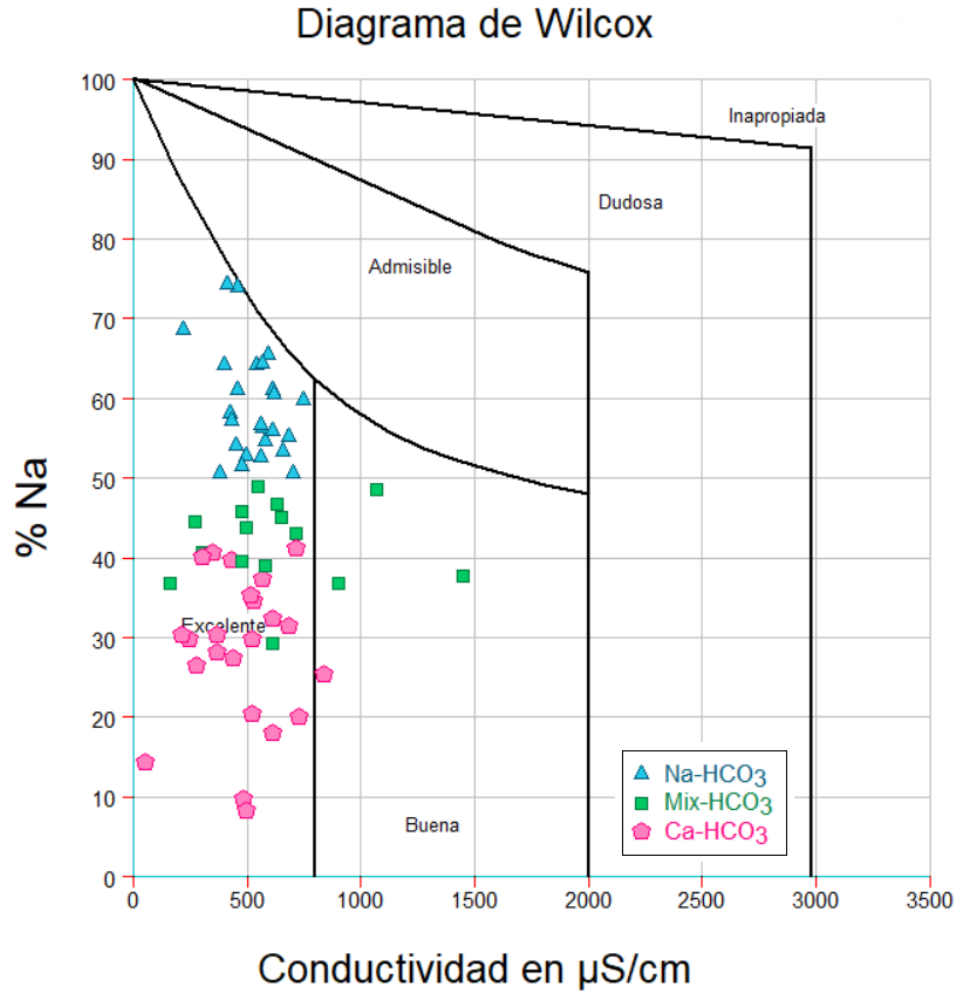


Figura 51. Diagrama de Wilcox. Porcentaje de sodio.

Otra forma de presentar el diagrama de Wilcox es mediante la comparación del Riesgo de Acumulación de Sodio (RAS) contra la conductividad eléctrica registrada.

El peligro de sodificación se determina a partir de la concentración de los cationes (calcio, sodio y magnesio) en miliequivalentes por litro, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (3)$$



En la Tabla 18 se sintetizan las diferentes clasificaciones:

Tabla 18. Clasificación del agua para riego según el riesgo de acumulación de sodio (Acosta & Salvadori, 2017; InfoAGRO, 2021).

C1	Agua de baja salinidad. Apta para riego. Aplicable en la mayor parte de los cultivos, en casi todos los suelos. Posibles problemas en suelos de muy baja permeabilidad.
C2	Agua de salinidad media. Apta para el riego. En ciertos casos se requiere emplear grandes volúmenes de agua en conjunto con cultivos tolerantes a la salinidad, en suelos de buena permeabilidad. Lavado de suelo ocasional.
C3	Agua de salinidad alta. Utilizable para riego en suelos con buen drenaje y buena permeabilidad, se requiere volúmenes de agua en exceso (lavado de suelo) en conjunto con cultivos muy tolerantes.
C4	Agua de salinidad muy alta. No apta para riego en muchos casos. Sólo aplicable en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando el lavado de suelo y en cultivos altamente tolerantes a la salinidad.
S1	Agua con bajo contenido de sodio. En la mayoría de los casos es apta para riego. Posibles problemas en cultivos muy sensibles al sodio.
S2	Agua con contenido medio de sodio. Representa cierto grado de RAS, sobre todo en suelos de granulometría fina (arcillosos) y de baja permeabilidad. Se debe evaluar las condiciones físicas del suelo. Posible uso en suelos de buena permeabilidad.
S3	Agua con alto contenido en sodio. Representa gran RAS. Se aconseja aportaciones de materia orgánica y empleo de yeso (corrección de sodio). Se requiere buen drenaje y abundante riego.
S4	Agua con muy alto contenido de sodio. Aguas inadecuadas para riego en general, a excepción de casos de baja salinidad, donde se puede utilizar con precauciones.

Como se observa en la Figura 52, el cien por ciento de las muestras se clasifican como S1, por lo que es agua con bajo contenido en sodio, siendo apta para riego. Posteriormente, se dividieron en tres clases: C1, C2 y C3. La clasificación C1 es donde se localizaron el menor número de muestras, cuyas características permiten su aplicación para riego. Por otro lado, casi el 90% de las muestras fueron catalogadas como aguas de salinidad media, que aunque son aptas para riego, se podría requerir lavado de suelo. Por



último, las pertenecientes al grupo C3, corresponden a muestras de salinidad alta, utilizables en suelos con buen drenaje y permeabilidad, incluyendo el lavado de suelo.

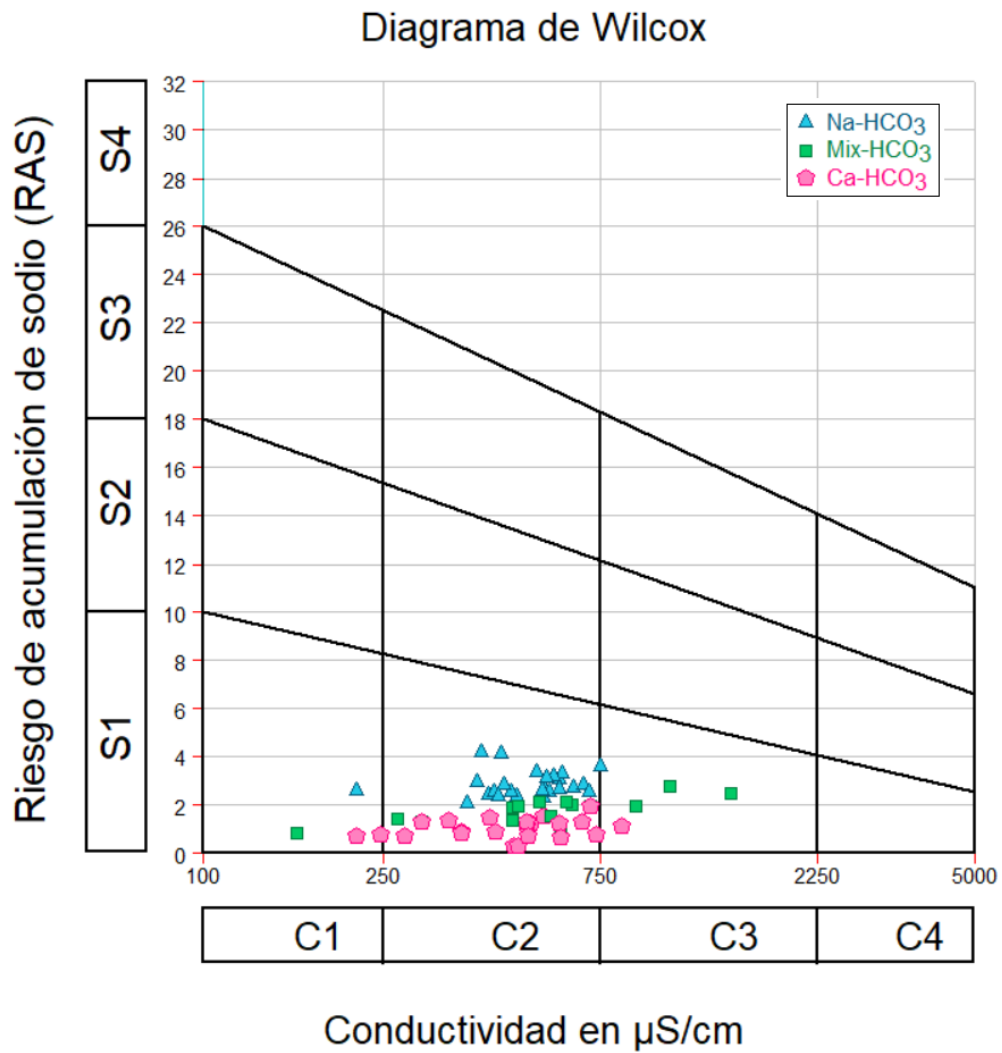


Figura 52. Diagrama de Wilcox para la clasificación del agua según el RAS.



Capítulo 7: Geoquímica del fluoruro disuelto en el agua subterránea

7.1 FAMILIAS DE AGUA Y LA CONCENTRACIÓN DE FLUORURO

Se determinó que las muestras con alto contenido de fluoruro mantienen una relación geoquímica con el agua tipo bicarbonatada sódica, lo cual se vio reflejado en los análisis estadísticos previamente expresados. Si bien la familia bicarbonatada cálcica registró algunos valores elevados en cuanto a la concentración del anión en cuestión, éstos figuran como valores atípicos en el grupo I, mientras que en el grupo II (muestras consideradas someras) las concentraciones se encuentran por debajo de 1.5 mg/L.

Reiterando la observación inicial y con base en la Figura 53, más del 50% de las muestras de agua de tipo Na-HCO₃ exceden el límite establecido de 1.5 mg/L. También destacando el hecho de que todas ellas corresponden exclusivamente al grupo I, es decir, a las muestras de pozos.

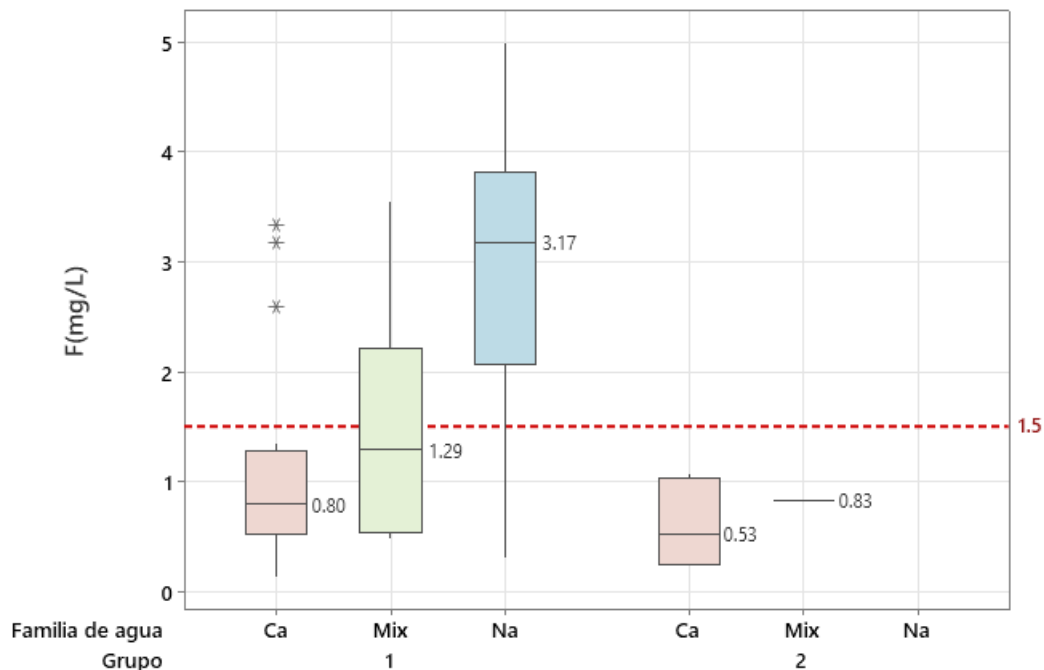


Figura 53. Diagrama de caja para la concentración de fluoruro. Análisis por grupo y familia.



Por lo anterior, se formuló el análisis estadístico por familia, compilando los datos correspondientes a los pozos (55), enfatizando sólo algunos de los parámetros, tal como se muestra en la Tabla 19:

Tabla 19. Análisis estadístico por familia. Muestras de agua subterránea (pozos).

Estadística por familia (pozos)							
Temperatura, pH, fluoruro, sodio y calcio							
Variable	Familia	N	Media	Desv.Est.	Mínimo	Máximo	NOM-127-SSA1-1994
T(°C)	Ca	16	24.43	2.30	19.60	28.20	-
	Mix	14	25.38	3.96	19.50	32.60	
	Na	25	28.14	2.90	23.00	33.90	
pH	Ca	16	7.32	0.18	7.01	7.62	6.5-8.5
	Mix	14	7.29	0.15	7.05	7.51	
	Na	25	7.55	0.21	7.23	8.22	
F(mg/L)	Ca	16	1.14	0.99	0.14	3.34	1.5
	Mix	14	1.55	0.99	0.48	3.54	
	Na	25	3.00	1.17	0.30	4.99	
Na(mg/L)	Ca	16	33.28	14.22	9.25	65.66	200
	Mix	14	56.69	27.75	14.03	120.57	
	Na	25	64.39	12.85	35.76	102.88	
Ca(mg/L)	Ca	16	57.52	18.13	30.70	87.48	-
	Mix	14	57.00	30.09	17.60	139.75	
	Na	25	35.92	10.06	13.37	51.40	

Esta misma relación entre la temperatura y la concentración de fluoruro es observable de manera espacial en la Figura 54. La concentración del ion, superior a 1.5 mg/L, coincide con zonas donde la temperatura excede los 25°C.

La disposición de las mayores concentraciones de calcio se encuentra hacia Aldama, coincidiendo con las mayores concentraciones de sodio. La temperatura y la concentración de fluoruro presentaron puntos en común como lo son hacia el norte, oeste y sureste de la ciudad de Chihuahua; algunos en áreas cercanas a las sierras (Figura 55).

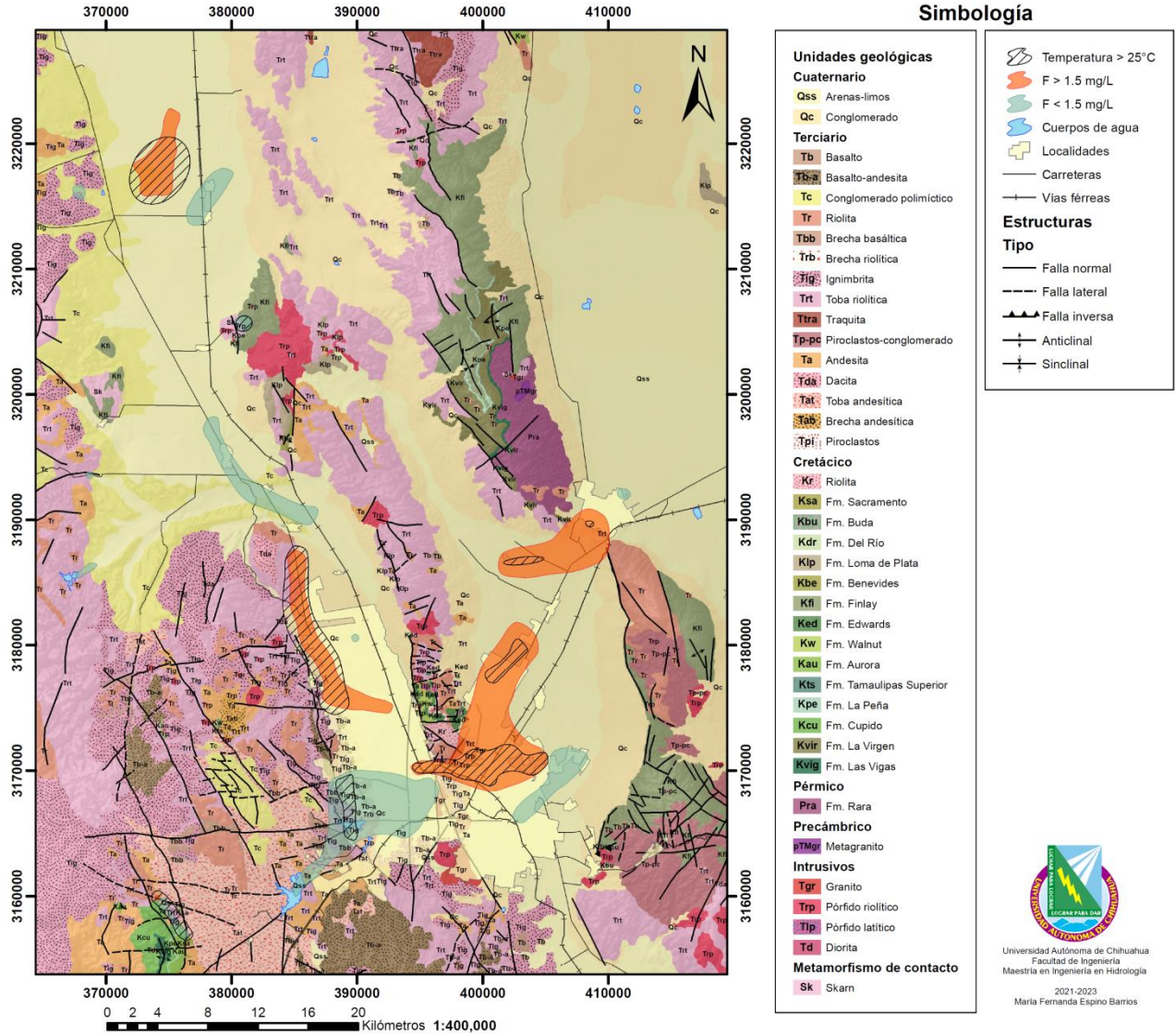


Figura 54. Relación espacial del fluoruro, temperatura y el factor geológico-estructural.

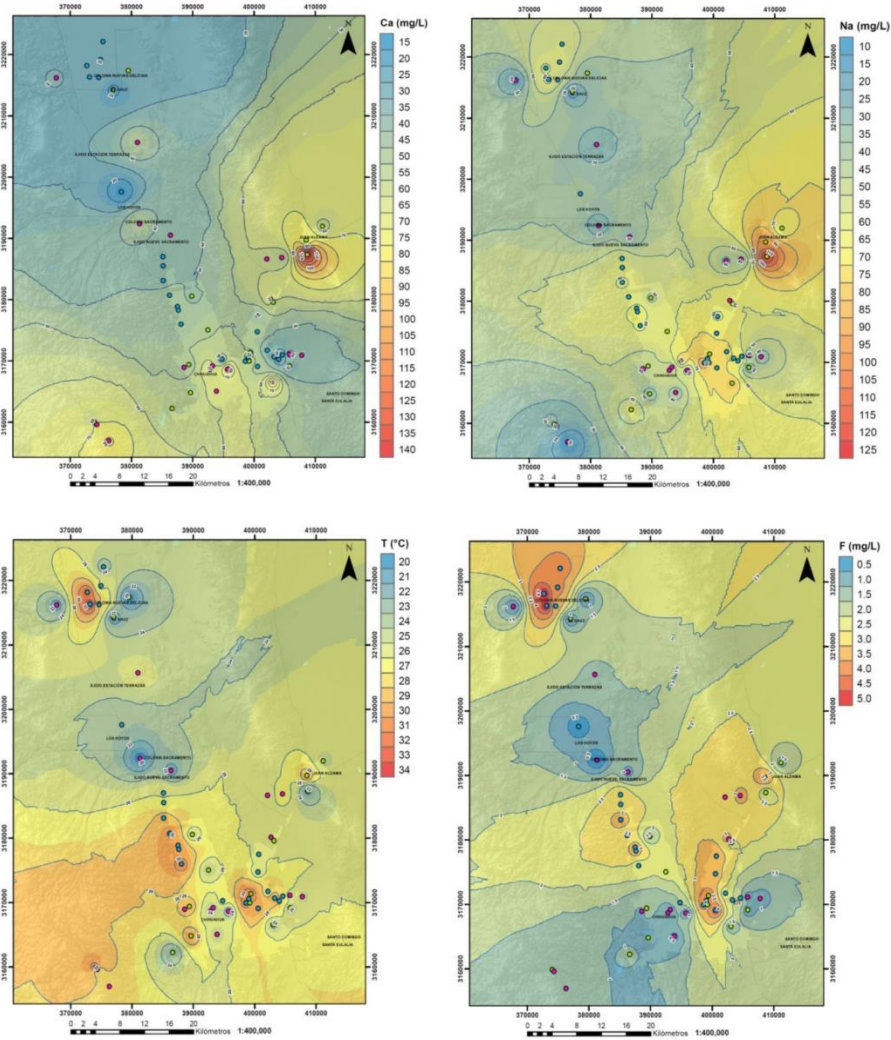


Figura 55. Interpolación por inverso de la distancia (IDW) del calcio, sodio, temperatura y fluoruro.

7.2 RELACIÓN ENTRE EL LITIO-FLÚOR

La concentración de litio en el agua subterránea depende de factores geológicos e hidrogeológicos, principalmente. Desde el punto de vista geoquímico, este elemento tiene una abundancia promedio en la corteza y una tendencia a estar ligado a la estructura cristalina de las rocas. Es utilizado como indicador del tiempo de residencia del agua en los sistemas acuíferos debido a su naturaleza altamente móvil. Su radio iónico influye en su potencial iónico y, por ende, en su afinidad por las moléculas de agua (Kavanagh *et al.*,



2017). El litio atraviesa por un enriquecimiento a través de la trayectoria de flujo (Edmunds *et al.*, 1987).

La comparación de las concentraciones de fluoruro (mg/L) y de litio ($\mu\text{g/L}$), hizo posible la diferenciación de tres zonas (Figura 56). En el inciso (a) se observa un grupo marcado, compuesto esencialmente de la familia Ca-HCO_3 y que se relaciona con un menor tiempo de residencia; sin embargo, también hay muestras correspondientes a la familia Mix-HCO_3 y solo una muestra Na-HCO_3 . La concentración de litio no supera los $45 \mu\text{g/L}$, mientras que la de fluoruro está por debajo de 1.4 mg/L . El inciso (b) hace referencia a una zona de mezcla o de flujo intermedio, donde las concentraciones de ambos elementos son variables. Por último, las concentraciones más altas de fluoruro, que superan 3.10 mg/L , se vinculan a concentraciones de litio superiores a $150 \mu\text{g/L}$; lo que establece su relación con sistemas de flujo regional, la familia Na-HCO_3 y también con la parte geológica-estructural, tal como se muestra en la Figura 57.

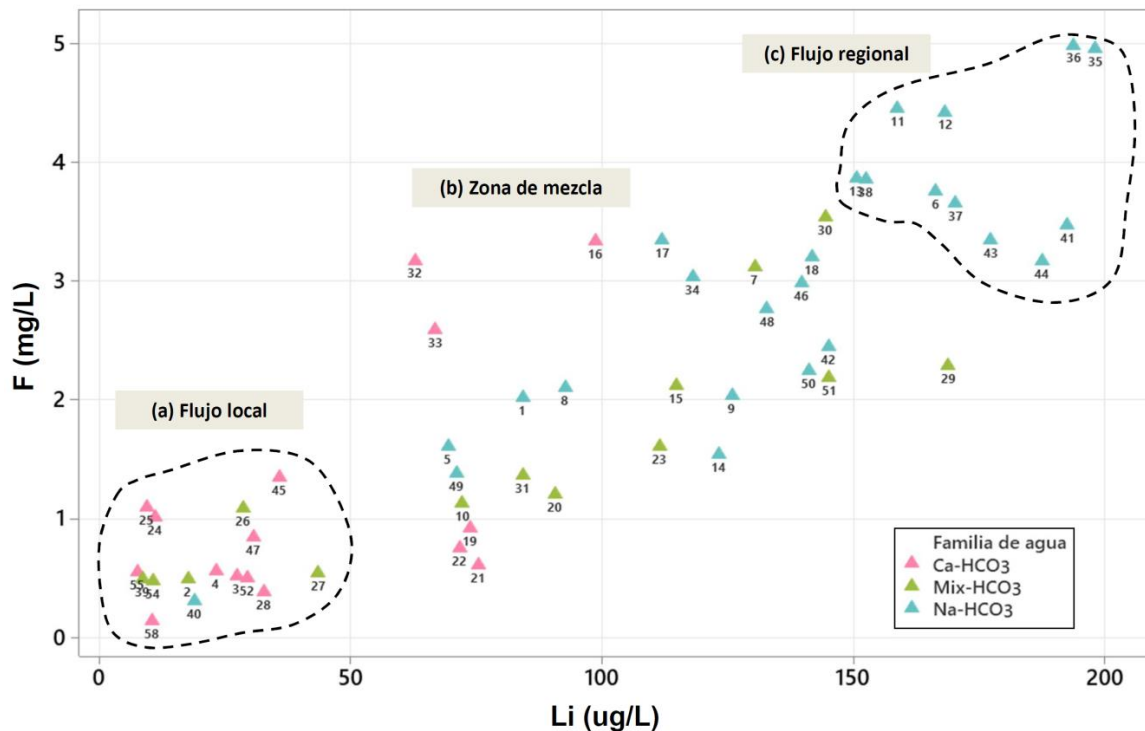


Figura 56. Relación del fluoruro y litio en los pozos dentro de la zona de estudio.

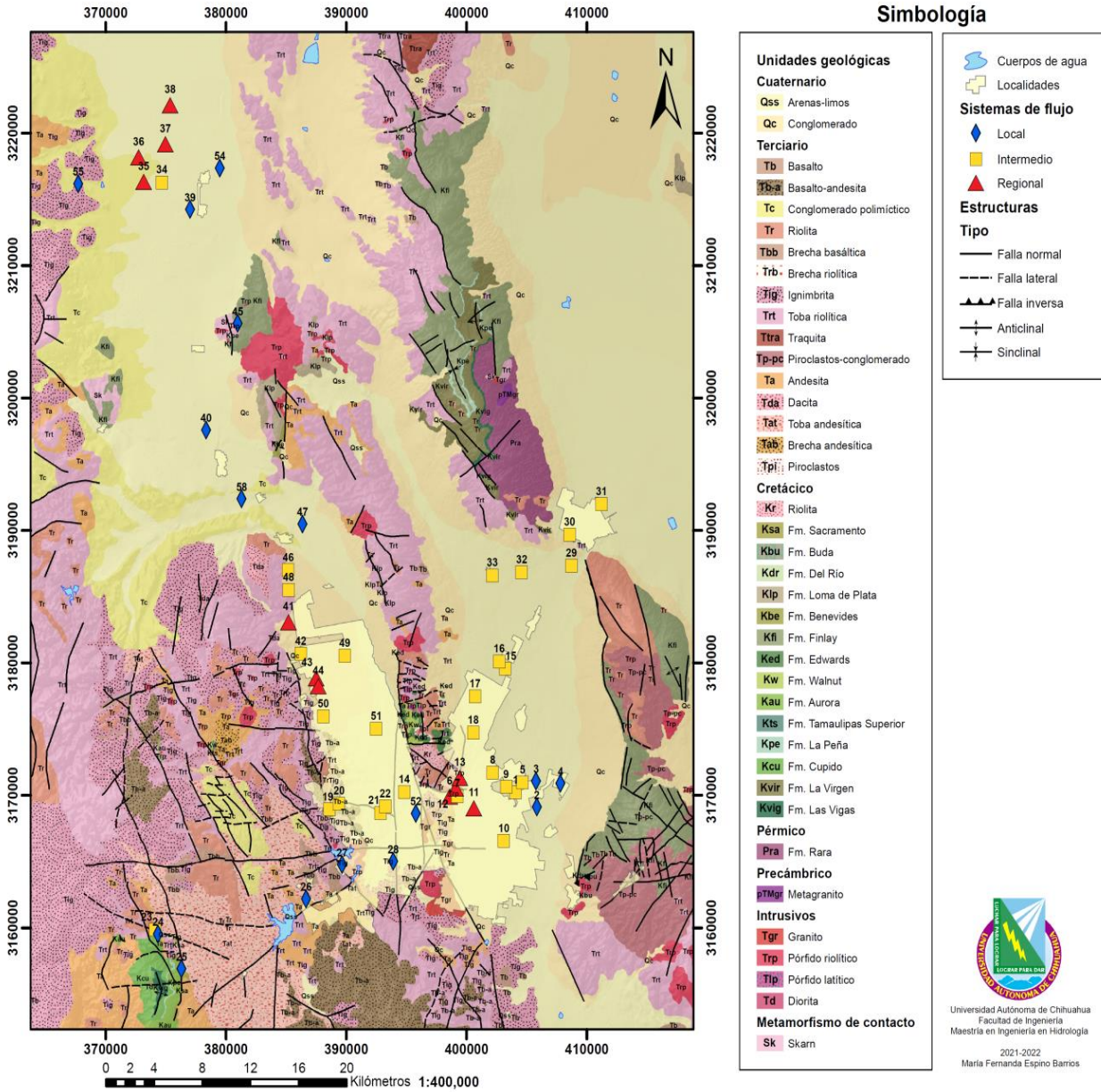


Figura 57. Localización de los sistemas de flujo.



7.3 GEOTERMÓMETROS

La temperatura de un reservorio de agua puede ser estimada de diversas maneras que incluyen estudios minerales, orgánicos y de fluidos. Una forma de calcular esta temperatura es a partir de los solutos, es decir, hace uso de la concentración de especies disueltas en el agua, cuya reacción está bajo el control térmico; se generan reacciones entre el agua y la roca por la que transita, alcanzando un equilibrio entre los minerales presentes en la roca y la composición del agua. Los más usados son los de sílice (cuarzo y calcedonia), Na-K-Ca, Na-K y los que toman en cuenta el Mg. Los geotermómetros, a excepción del de sílice, son empíricos y no están determinados por la solubilidad de un mineral (Marshall & Fairbridge, 1999). Indican la temperatura del último equilibrio entre el agua y la roca.

Existen diferentes factores a tomar en cuenta según la información de entrada, así como los resultados que pudieran obtenerse. En algunas zonas, el termómetro Na/K puede estimar temperaturas muy altas como consecuencia del intercambio iónico con los minerales arcillosos, principalmente si las temperaturas a profundidad son menores a 200°C (Henley *et al.*, 1984).

Por otro lado, el uso del termómetro Na-K-Ca presenta reglas. El valor de β cambia dentro de la ecuación según diferentes circunstancias: inicialmente se usa el valor de 4/3, si el resultado de $t < 100^\circ$ y $\left[\log \frac{\sqrt{Ca}}{Na} + 2.06 \right] > 0$; pero si la temperatura con dicho valor de β supera los 100°C y la función descrita es negativa, el valor de beta debe cambiarse a 1/3 (Henley *et al.*, 1984). El geotermómetro puede subestimar la temperatura del reservorio debido a la continua reacción con el medio rocoso a menores temperaturas durante el ascenso (Fournier & Truesdell, 1973). Para situaciones donde el sodio y el calcio no alcanzan el equilibrio suficientemente rápido, Giggenbach propuso el termómetro K-Mg (concentraciones mg/kg) (Henley *et al.*, 1984).

Las aguas termales pueden estar enriquecidas con elementos alcalinos como el litio (elemento común), rubidio y cesio, por lo que su potencial como geotermómetros es



posible. En 1981 Fouillac y Michard propusieron un termómetro empírico de Na/Li, la variación de la fórmula partía del nivel de salinidad del agua (Cl^-) (Henley *et al.*, 1984). La relación termodinámica de ambos elementos surgió a partir de la evaluación de sistemas geotermales explorados, aguas termales naturales, análisis de aguas superficiales y experimentos de interacción agua-roca realizados por Ellis y Mahon en 1967 (Fouillac & Michard, 1981).

La saturación de cuarzo puede suponerse en la mayoría de los pozos profundos. Cuando los fluidos en sistemas geotermales superan los 180°C están en equilibrio con el cuarzo, que es un mineral formador de rocas primario y secundario. Los polimorfos de sílice exhiben una estructura menos ordenada y una solubilidad mayor a la del cuarzo, además de formarse en temperatura por debajo de los 180°C (Karingithi, 2009).

Una de las consideraciones más importantes para la aplicación de la geotermometría es que no exista mezcla del flujo regional con agua somera. Por lo anterior, se requiere información de pozos que capten agua que circule a mayor profundidad (Na-HCO_3) y que, por ende, presenten mayores temperaturas ($>26^\circ\text{C}$) y concentraciones de Na ($>60 \text{ mg/L}$), F ($>3 \text{ mg/L}$), Sr ($>400 \mu\text{g/L}$), B ($>250 \mu\text{g/L}$) y Li ($>150 \mu\text{g/L}$).

En la Tabla 20 se enlistan los métodos anteriormente mencionados, así como sus respectivas fórmulas.

El geotermómetro de calcedonia determinó temperaturas del orden de 50°C , principalmente. La relación del Na/K es dependiente del intercambio catiónico; este geotermómetro es conveniente para la estimación térmica en aguas cloruradas provenientes de sistemas de alta temperatura (180°C) (Karingithi, 2009). Por lo que esto representa una de las limitaciones a considerar para su aplicación, siendo inapropiado para este estudio.



Tabla 20. Ecuaciones para el cálculo de temperatura para geotermómetros seleccionados. Todas las concentraciones en mg/kg, excepto Na/Li (mol/kg) (Fouillac & Michard, 1981; Fournier, 1990; Henley et al., 1984).

Geotermómetro	Ecuación	
Cuarzo	$t^{\circ}\text{C} = \frac{1309}{5.19 - \log\text{SiO}_2} - 273.15$	(4)
Calcedonia	$t^{\circ}\text{C} = \frac{1032}{4.69 - \log\text{SiO}_2} - 273.15$	(5)
Na/K [Fournier]	$t^{\circ}\text{C} = \frac{1217}{\log(\text{Na/K}) + 1.483} - 273.15$	(6)
Na/K [Truesdell]	$t^{\circ}\text{C} = \frac{855.6}{\log(\text{Na/K}) + 0.8573} - 273.15$	(7)
Na-K-Ca	$t^{\circ}\text{C} = \frac{1647}{\log(\text{Na/K}) + \beta \left[\log \left(\frac{\sqrt{Ca}}{\text{Na}} \right) + 2.06 \right] + 2.47} - 273.15$	(8)
K-Mg	$t^{\circ}\text{C} = \frac{4410}{13.95 - \log \left(\frac{K^2}{\text{Mg}} \right)} - 273.15$	(9)
Na/Li (Cl < 0.3 M)	$t^{\circ}\text{C} = \frac{1000}{\log(\text{Na/Li}) + 0.38} - 273.15$	(10)
Na/Li (Cl > 0.3 M)	$t^{\circ}\text{C} = \frac{1195}{\log(\text{Na/Li}) - 0.13} - 273.15$	(11)

El desarrollo del geotermómetro de Na-K-Ca fue para su aplicación en aguas con altas concentraciones de calcio. Toma en consideración restricciones como el equilibrio entre los feldespatos sódicos y potásicos. En comparación con geotermómetros como el del cuarzo y el Na/K, éste no tiene resultados muy elevados (Karingithi, 2009). Para este estudio, el valor promedio obtenido fue alrededor de 37 °C.

Los resultados del geotermómetro de K/Mg, se establecen en un rango aproximado de 45-55°C, principalmente. Mientras que los obtenidos del de Na/Li ostentan los valores más elevados, superando los 100°C (Tabla 21).

Los resultados obtenidos por medio de los cuatro termómetros aplicados sugieren que los geotermómetros de calcedonia y de K/Mg de Giggenbach controlan las temperaturas máximas a profundidad, en términos generales.



Tabla 21. Resultados de los geotermómetros aplicados.

Clave	T(°C)	Calcedonia	Na-K-Ca	Na/Li Fouillac	K/Mg Giggenbach
C6	31.0	50.56	43.63	104.07	44.78
C11	29.5	57.38	35.53	123.07	42.30
C12	32.1	46.13	34.74	124.27	44.41
C13	30.8	42.03	33.89	121.25	41.54
C35	33.9	51.26	47.19	149.50	55.28
C36	32.0	38.64	44.21	149.13	53.90
C41	28.9	45.94	28.60	148.43	45.12
C43	29.5	50.19	29.70	144.63	48.39
C44	29.7	57.07	32.75	143.55	51.35

7.4 HIDROTHERMALISMO

Lo que se conoce como gradiente geotérmico terrestre, es el incremento de la temperatura respecto a la profundidad, por lo que la temperatura del agua subterránea ha sido usada para el establecimiento de una profundidad aparente de circulación (Mifflin, 1968), pues una mayor temperatura supondría un mayor recorrido vertical.

El gradiente geotérmico promedio es de alrededor de 30 m por °C (Esparza-Delgado, 2017; Ingeniería de Evaluación y Prospección S.A. de C.V., 1996). El valor máximo registrado en los resultados de geotermómetros es de 57.38 °C (calcedonia), mientras que la temperatura mínima en campo fue de 19.6 °C. Considerando 37.78 °C de diferencia entre ambos valores y el gradiente geotérmico medio, el sistema de flujo regional estaría cercano a los 1135 m.

Autores como Ingeniería de Evaluación y Prospección S.A. de C.V. (1996) han resaltado que la presencia de elementos radiactivos en las rocas volcánicas de composición félsica, dentro de la zona de estudio, imposibilita determinar la profundidad aparente de circulación. De modo que el decaimiento radiactivo representa un factor a considerar para la temperatura del agua.

La sierra Peña Blanca es una estrecha cadena volcánica, conocida por su mineralización de uranio, en donde los yacimientos se desarrollan en una secuencia



ignimbrítica de composición riolítica (Badilla-Cruz & Aponte-Barrera, 1989; Leroy & George-Aniel, 1992). Del mismo modo, al oeste se tienen secuencias de rocas ígneas de las cuales se han realizado estudios en la zona de Majalca-San Marcos (Reyes-Cortés *et al.*, 2007), donde se identificó y determinó el origen de diversas especies minerales radiactivas. La desintegración de los isótopos de los elementos radiactivos en las rocas tiene como resultado la emisión de energía (Smedley & Kinniburgh, 2023). Lo anterior propone que las reacciones de decaimiento de los elementos radiactivos presentes en estas rocas constituyen una importante fuente de calor. De esta manera la profundidad aparente de circulación puede variar e inclusive ser menor a los 1135 m anteriormente calculados.

7.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES

Con ayuda del equipo de la UASLP se realizó un análisis de componentes principales en el que se evaluó los resultados obtenidos de 29 parámetros en las muestras de agua de pozos. Este análisis es un método estadístico que permite reducir datos por variables y sus características, con la finalidad de obtener las combinaciones que expliquen la mayor parte de la varianza de todas las variables (Greenacre *et al.*, 2022). Se obtuvo que el CP1 representa el 36.6% de la variabilidad, mientras que el CP2 el 28.2%, el CP3 el 6.8% y el CP4 el 5.8%, significando en conjunto el 77.4 % de la variabilidad de los datos.

Posteriormente se realizó una rotación *varimax* (Tabla 22), el cual es un método que tiene como objetivo maximizar las ponderaciones dentro de cada factor, para minimizar el número de variables en cada uno de ellos, logrando que cada variable sea representativa (Méndez-Martínez & Rondón-Sepúlveda, 2012). El porcentaje de la varianza tras la rotación *varimax* es de 32.41% para D1; 30.24% para D2; 8.69% para D3 y 6.13% para D4; es decir, 77.47% de la variabilidad. Con las nuevas cargas factoriales obtenidas se identificaron los parámetros con los valores más altos en cada factor.



Tabla 22. Cargas factoriales tras rotación varimax.

Variable	D1	D2	D3	D4
T(°C)	-0.068	0.657	0.303	-0.324
pH	-0.562	0.233	0.001	0.611
CE(uS/cm)	0.916	0.252	0.169	-0.163
Ca(mg/L)	0.854	-0.218	-0.039	-0.338
Mg(mg/L)	0.809	-0.301	0.085	-0.170
Na(mg/L)	0.583	0.545	0.362	0.229
K(mg/L)	0.678	0.260	0.065	0.042
HCO ₃ (mg/L)	0.765	-0.050	0.166	-0.411
Cl(mg/L)	0.912	-0.033	0.074	0.113
SO ₄ (mg/L)	0.836	0.347	0.072	0.082
F(mg/L)	0.113	0.935	0.053	-0.026
NO ₃ (mg/L)	0.359	-0.148	0.432	-0.067
As(ug/L)	-0.008	0.913	-0.108	0.210
Hg(ug/L)	-0.159	0.791	0.047	0.238
B(ug/L)	0.582	0.713	0.161	0.039
W(ug/L)	-0.241	0.867	0.000	0.162
Cs(ug/L)	-0.059	0.805	0.288	-0.328
Ge(ug/L)	-0.115	0.871	0.160	-0.034
Li(ug/L)	0.192	0.897	0.291	-0.039
Mo(ug/L)	0.025	0.953	-0.107	0.032
Rb(ug/L)	0.314	0.819	0.092	-0.242
Si (mg/L)	0.050	0.217	0.887	0.071
Fe(ug/L)	0.528	0.137	0.221	-0.086
Br(ug/l)	0.734	-0.098	0.292	0.377
Sc(ug/l)	0.274	0.178	0.840	-0.035
I(ug/l)	0.803	-0.148	0.233	0.375
Se(ug/l)	0.379	-0.175	0.219	0.522
U(ug/l)	0.873	0.148	0.124	0.104
Sr(ug/l)	0.881	0.080	-0.181	-0.065

En el D1 las variables más distintivas son el pH, la CE, Ca, Mg, Na, K, HCO₃, Cl, SO₄, Fe, Br, I, U y Sr. En conjunto, representan proceso de alteración de minerales de silicato, como feldspatos, anfíboles y micas; fosfatos (apatitas) y posiblemente minerales secundarios (arcillosos), así como carbonatados. Dentro de las reacciones y/o procesos se encuentran la hidrólisis, disolución, procesos redox, intercambio catiónico y alteración



hidrotermal (British Geological Service, 2000; IGME, 2000; Kumar, 2021; Liesch *et al.*, 2015; Mora *et al.*, 2018; Musgrove, 2021; Subba-Rao *et al.*, 2006; Traoré & Bokar, 2020).

El D2 tiene cargas factoriales importantes de F, Hg, Li, As, B, Cs, Rb, Mo, Ge, W y temperatura; es decir, se compone principalmente de elementos litófilos, los cuales forman enlaces fácilmente con los átomos de oxígeno y se concentran en la corteza terrestre, pues son esenciales para la formación de minerales (Halder, 2017; McDonough, 2003).

Este factor también incluye los procesos de hidrólisis/alteración de silicatos, como feldspatos, micas, anfíboles y minerales arcillosos (Dobrzyński *et al.*, 2017; Embaby & Redwan, 2019; Subba-Rao *et al.*, 2006). Se presentan posiblemente ambientes oxidantes, puesto que hay elementos que son más solubles bajo estas condiciones (p.e. molibdeno) (Mora *et al.*, 2018; Smedley & Kinniburgh, 2017). Algunos de estos elementos son de fuerte naturaleza móvil después de la alteración (p.e. litio) (Kavanagh *et al.*, 2017), mientras que otros pueden presentar baja movilidad debido a la adsorción en minerales arcillosos (p.e. rubidio) (Embaby & Redwan, 2019). Hobson *et al.* (2020) han relacionado la presencia de wolframio a la mezcla de agua subterránea somera-profunda con fluidos geotermales.

El D3 y D4 tienen menos variables representativas, las cuales indicarían proceso de hidrólisis/alteración de minerales de silicato en general y posible contaminación antropogénica (IGME, 2000).

CLUSTERIZACIÓN AGLOMERATIVA JERÁRQUICA

El análisis de aglomeración es una técnica multivariable que permite la agrupación (Figura 58) de los puntos según las propiedades (Taşan *et al.*, 2022).

El clúster 1 ($n=29$) abarca los tres tipos de familia de agua; sin embargo, la familia Na-HCO₃ tiene mayor presencia en este conjunto (48.28%). El escandio es la variable con una media superior a las demás agrupaciones. Guarda una relación espacial preferencial



con las zonas de alta concentración de fluoruro (>1.5 mg/L), así como con las fallas normales NW-SE de la región, al noroeste de la ciudad de Chihuahua, hacia el valle de Aldama (inmediaciones de la sierra Nombre de Dios) y Aldama; a través de un flujo intermedio, principalmente.

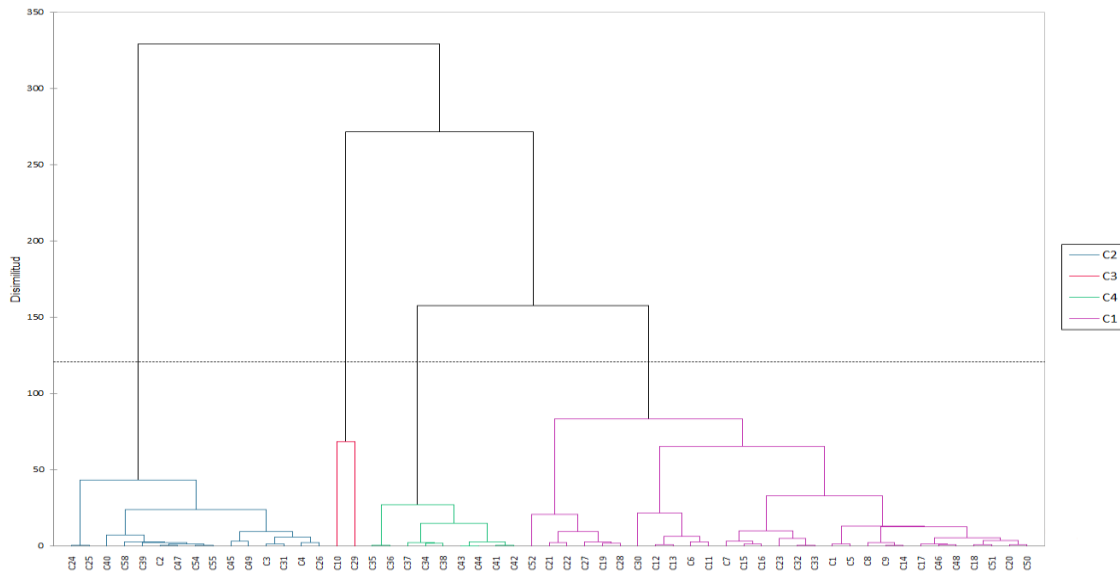


Figura 58. Dendrograma resultado de la clusterización.

El clúster 2 ($n=15$) se compone de las familias Ca-HCO_3 (53.3%), Mix-HCO_3 (33.33%) y Na-HCO_3 (13.33%). Generalmente, su distribución es a lo largo de la parte central de las cuencas, con algunos puntos en las sierras de la zona (rocas ígneas y sedimentarias). El tipo de flujo predominante es local.

El clúster 3 ($n=2$) es agua de tipo Mix-HCO_3 , con un punto al sureste de la mancha urbana de Chihuahua (potable) y otro en Juan Aldama (recreativo), ambos de flujo intermedio. Se encuentran en valle (relleno de cuenca), entre sierras de carácter ígneo y calcáreo. Dentro de este conjunto destacan los valores promedio de la conductividad eléctrica (>1000 $\mu\text{S/cm}$), Ca, Mg, Na, K, HCO_3 , Cl, SO_4 , NO_3 , B, Si, Fe, Br, I, Se, U y Sr; las cuales son variables que destacaron en el D1. En una comparación interna, el pozo en Chihuahua resalta en la concentración de NO_3 , Si, Br, Sc, I y Se.



El clúster 4 ($n=9$) se compone de agua Na-HCO₃, su distribución muestra mayor interacción con material ígneo (zona de recarga) y de relleno (al NW). Semejante al clúster 1, se localiza en zonas de alta concentración de fluoruro (>1.5 mg/L), siendo el valor promedio de este ion el más alto comparado con los otros grupos. También destaca la media de la temperatura, pH, As, Hg, W, Cs, Ge, Li, Mo y Rb; cuyas cargas factoriales son altas en D2. El tipo de flujo predominante es el regional.

La estadística descriptiva por grupos, así como la distribución de estos, se puede observar en la Tabla 23 y la Figura 59, respectivamente.

Tabla 23. Estadística descriptiva de grupos de Clusterización Aglomerativa Jerárquica.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA POR CAJ															
Variable	Cluster	N	Media	Variable	Cluster	N	Media	Variable	Cluster	N	Media	Variable	Cluster	N	Media
T(°C)	1	29	27.42	Cl(mg/L)	1	29	17.78	Cs(ug/L)	1	29	4.16	Sc(ug/l)	1	29	3.88
	2	15	23.25		2	15	11.86		2	15	0.38		2	15	2.42
	3	2	22.45		3	2	58.20		3	2	2.34		3	2	4.42
	4	9	28.99		4	9	11.14		4	9	9.60		4	9	3.68
pH	1	29	7.39	SO4(mg/L)	1	29	67.71	Ge(ug/L)	1	29	0.34	I(ug/l)	1	29	39.15
	2	15	7.43		2	15	27.40		2	15	0.01		2	15	27.66
	3	2	7.10		3	2	201.30		3	2	0.13		3	2	117.20
	4	9	7.55		4	9	73.94		4	9	1.36		4	9	20.90
CE(uS/cm)	1	29	599.00	F(mg/L)	1	29	2.31	Li(ug/L)	1	29	106.86	Se(ug/l)	1	29	5.31
	2	15	377.50		2	15	0.78		2	15	26.33		2	15	1.99
	3	2	1175.00		3	2	1.71		3	2	120.60		3	2	174.00
	4	9	529.00		4	9	3.66		4	9	170.64		4	9	1.38
Ca(mg/L)	1	29	49.45	NO3(mg/L)	1	29	19.03	Mo(ug/L)	1	29	4.04	U(ug/l)	1	29	8.56
	2	15	43.22		2	15	7.26		2	15	1.06		2	15	4.77
	3	2	115.60		3	2	36.96		3	2	2.42		3	2	31.07
	4	9	33.63		4	9	1.08		4	9	8.02		4	9	5.39
Mg(mg/L)	1	29	5.99	As(ug/L)	1	29	26.63	Rb(ug/L)	1	29	14.17	Sr(ug/l)	1	29	721.70
	2	15	4.44		2	15	11.89		2	15	4.51		2	15	444.80
	3	2	20.35		3	2	24.80		3	2	15.80		3	2	3016.00
	4	9	2.07		4	9	51.00		4	9	20.14		4	9	472.10
Na(mg/L)	1	29	60.02	Hg(ug/L)	1	29	0.26	Si (mg/L)	1	29	13.52				
	2	15	30.61		2	15	0.18		2	15	8.56				
	3	2	99.90		3	2	0.19		3	2	14.83				
	4	9	59.60		4	9	0.47		4	9	13.37				
K(mg/L)	1	29	2.51	B(ug/L)	1	29	213.30	Fe(ug/L)	1	29	34.00				
	2	15	1.48		2	15	64.00		2	15	21.32				
	3	2	3.70		3	2	401.00		3	2	51.50				
	4	9	2.18		4	9	259.60		4	9	25.39				
HCO3(mg/L)	1	29	216.74	W(ug/L)	1	29	1.68	Br(ug/l)	1	29	118.90				
	2	15	180.20		2	15	0.30		2	15	60.50				
	3	2	302.60		3	2	0.22		3	2	430.90				
	4	9	174.60		4	9	7.16		4	9	42.30				

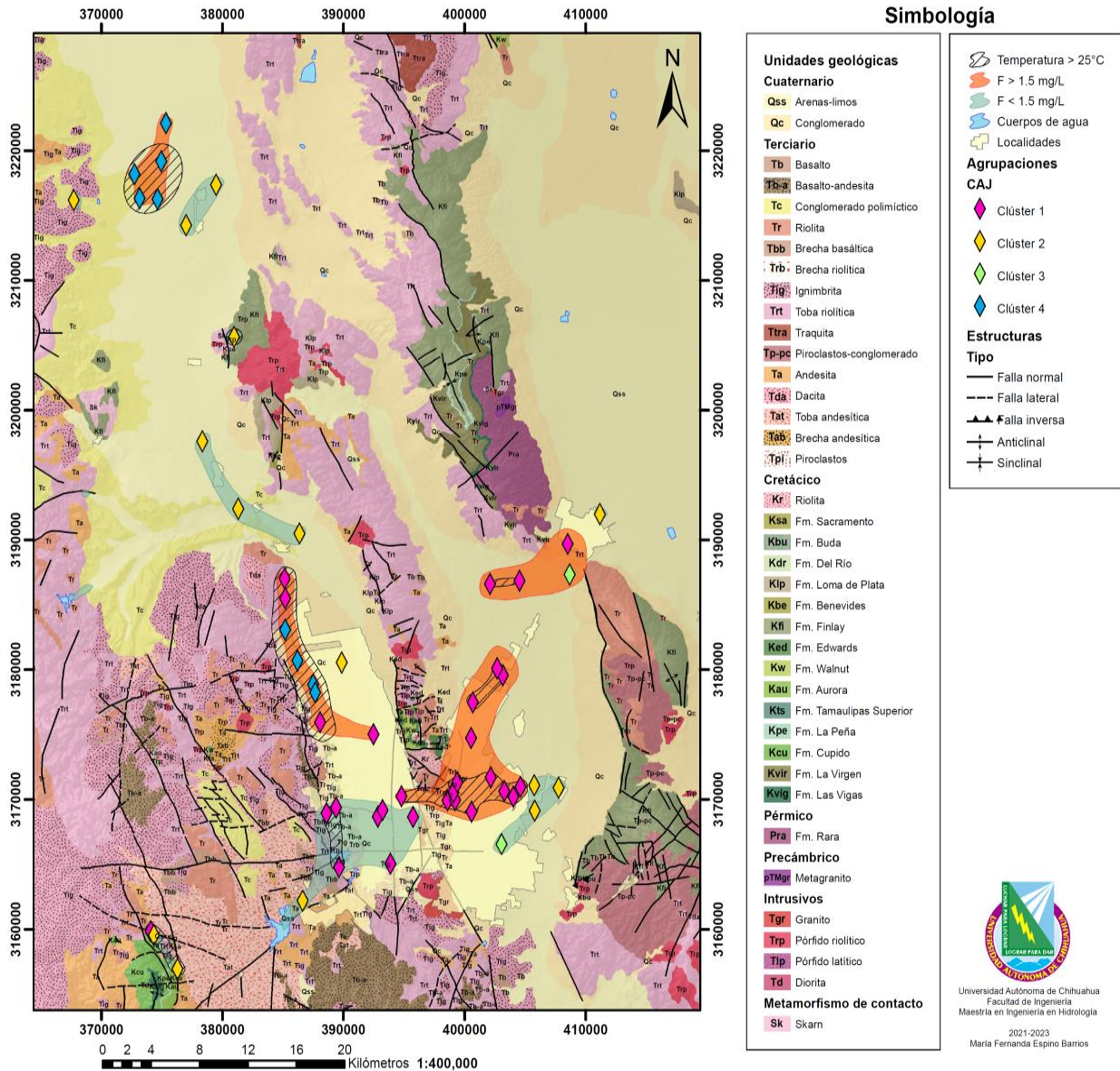


Figura 59. Localización de agrupaciones (CAJ).

7.6 COMPOSICIÓN MINERALÓGICA Y SU RELACIÓN CON EL FLUORURO

Durante las primeras etapas de enfriamiento de un magma y su cristalización fraccionada, el fluoruro tiende a ser incompatible, por lo que es difícil su introducción a las estructuras de los primeros minerales que solidifican, ocasionando un enriquecimiento de F^- en las rocas de composición félsica y fluidos hidrotermales posteriores (Nordstrom & Smedley, 2022).



El fluoruro puede encontrarse en el agua subterránea en diferentes concentraciones y su fuerza iónica contribuye en la solubilidad del mineral portador, el cual puede liberar el ion de manera lenta (Huizar-Álvarez *et al.*, 2016).

Estrada-García (2022) describió macro y microscópicamente el barreno de un pozo exploratorio dentro del área de estudio. Consistió en la descripción estratigráfica de muestras obtenidas durante la perforación de este, las cuales fueron proporcionadas por la Junta Municipal de Agua y Saneamiento. Identificó cuatro zonas, constituidas principalmente por rocas ígneas de diferentes composiciones.

En cuanto a las rocas de composición riolítica, macroscópicamente, se describió un contenido de alrededor de 65% de cuarzo, 30% feldespatos y 5% micas; una matriz con moderado vidrio volcánico, así como argilización y oxidación. Las andesitas se componen de 65% de plagioclasas, 25% de feldespatos, 5-25% de piroxenos y 5-10% de anfíboles (Estrada-García, 2022).

Microscópicamente, los fragmentos de 10 a 20 m de profundidad se clasificaron como: andesita, vitrófido, ignimbrita (sic) y riolita. Los vitrófidos presentan fenocristales de biotita y representan el 15.78% del total de clastos. Las secuencias ignimbríticas presentan fenocristales de cuarzo (30%) y feldespatos (70%) en su estructura. La riolita tiene una matriz vítrea con 70% de feldespatos y 30% de cuarzo (Estrada-García, 2022). Por otro lado, las andesitas presentaron 65% de feldespatos y un 35% de piroxenos, así como una matriz afanítica de plagioclasa y vidrio volcánico (Estrada-García, 2022).

Entre los 140 y 150 m de profundidad, la mineralogía del granito se compone de 75% de feldespatos y 25% de cuarzo. La composición de la riolita es 55% cuarzo y 45% feldespato; de textura fluidal con evidencia de desvitrificación. La toba riolítica posee una matriz fina de cuarzo y presenta fenocristales de cuarzo y feldespato a partes iguales; ésta representa el 75% de los fragmentos (Estrada-García, 2022). En la zona entre los 390 y 400 m, se presentó una roca de composición intermedia (andesita) con 70% de plagioclasas, 7%



de feldespatos, 20% de piroxenos y 3% de anfíboles; además de acumulación secundaria de calcita (Estrada-García, 2022).

La toba riolítica, correspondiente al tramo de 400 a 410 m de profundidad, se compone esencialmente por vidrio volcánico con muestra de desvitrificación. Exhibe fenocristales de biotita, cuarzo y feldespatos. En el tramo de 490 y 500 m de profundidad, la roca presenta una matriz fina de cuarzo y fragmentos de vidrio; así como fenocristales de cuarzo y feldespatos (Estrada-García, 2022).

Grupos minerales como las micas y los anfíboles presentan una tasa de intemperización baja, sin embargo, el fluoruro se libera desde su estado hidroxilo, incrementando su concentración (Huizar-Álvarez *et al.*, 2016). El flúor es el elemento halógeno más ligero y electronegativo; sus iones tienen la misma carga y radio iónico que el OH-, permitiendo que el F⁻ sustituya a los hidroxilos (Nordstrom & Smedley, 2022).

La hidrólisis es uno de los procesos más importantes en cuanto a la intemperización química. La disociación del ácido carbónico (durante recarga natural) genera iones H⁺. Éste permite la transformación de feldespatos a minerales arcillosos; por ejemplo, la disolución de la albita permite la liberación de sodio y bicarbonatos, reflejado en la disminución del calcio. La composición química bicarbonatada sódica del agua favorece la liberación del fluoruro de los minerales (Huizar-Álvarez *et al.*, 2016). Además la interacción agua-roca ígnea (contenido de vidrio volcánico) genera un proceso de desvitrificación, lo que da oportunidad a un intercambio entre iones hidrógeno por el sodio presente en la roca (Núñez-Peña *et al.*, 2015), resultando en un cambio de composición del agua (a Na-HCO₃).

Se realizó un muestreo de tobas volcánicas como parte de una investigación desarrollada al este de la zona de estudio (Ren *et al.*, 2022). La clasificación química de dichas muestras se efectuó con base al diagrama TAS (*Total Alkali-Silica*, por sus siglas en inglés), donde la mayor parte de ellas se situaron sobre la región de la riolita. El análisis de composición mostró la presencia de minerales del grupo de los feldespatos: ortoclasa, albita y anortita (en orden de porcentaje total); también se identificaron biotitas y anfíboles, los



cuales contenían fluoruro en su composición. Las biotitas poseían F^- en un rango de 1 a 4.5 wt.%.

En el estudio realizado por Ingeniería de Evaluación y Prospección S.A. de C.V. (1996) se señaló la presencia del fluoruro en la fase vítrea, así como en las biotitas de las rocas volcánicas.

7.7 ÍNDICES DE SATURACIÓN MINERAL

Los índices de saturación permiten establecer un panorama del grado de saturación en una solución respecto a diferentes fases minerales, es decir, sobresaturación ($IS > 1$), subsaturación ($IS < 1$) o equilibrio ($IS = 1$), según una escala logarítmica. Cuando se presenta un estado de sobresaturación, indica que existe una tendencia a la precipitación de cierta fase; por el contrario, cuando se encuentra subsaturado respecto al mineral en cuestión, se disolverá.

Dicho índice se calcula a partir del Producto de Actividad Iónica (PAI) y la constante de equilibrio (K_{eq}):

$$IS = \log \left(\frac{PAI}{K_{eq}} \right) \quad (12)$$

El índice de saturación de la fluorita se ve fuertemente influenciado por las concentraciones de elementos móviles como el litio (relacionado a fluidos geotermales) (Figura 60), arsénico (Figura 61) y boro (Figura 62), lo que se confirma con los coeficientes de correlación de estos elementos litófilos con el fluoruro; misma que ha sido señalada en trabajos anteriores, como el de Ingeniería de Evaluación y Prospección S.A. de C.V., (1996). Interpretando el aumento de la concentración de fluoruro como resultado de la interacción entre las rocas ígneas félsicas y el agua de los sistemas acuífero, lo que conlleva



la liberación y movilización de diversos iones por medio de la hidrólisis o alteración de los minerales portadores.

Como se observa en cada una de las figuras, la familia bicarbonatada sódica engloba mayor correlación entre estos dos factores: el índice de saturación respecto a la fluorita y las concentraciones de los diferentes elementos traza.

Las concentraciones relativamente altas de elementos como el litio, boro y arsénico podrían indicar agua termal de origen profundo; este tipo de agua puede ascender por medio de fallas y mezclarse con agua de menor profundidad (Sayer & Goff, 1980).

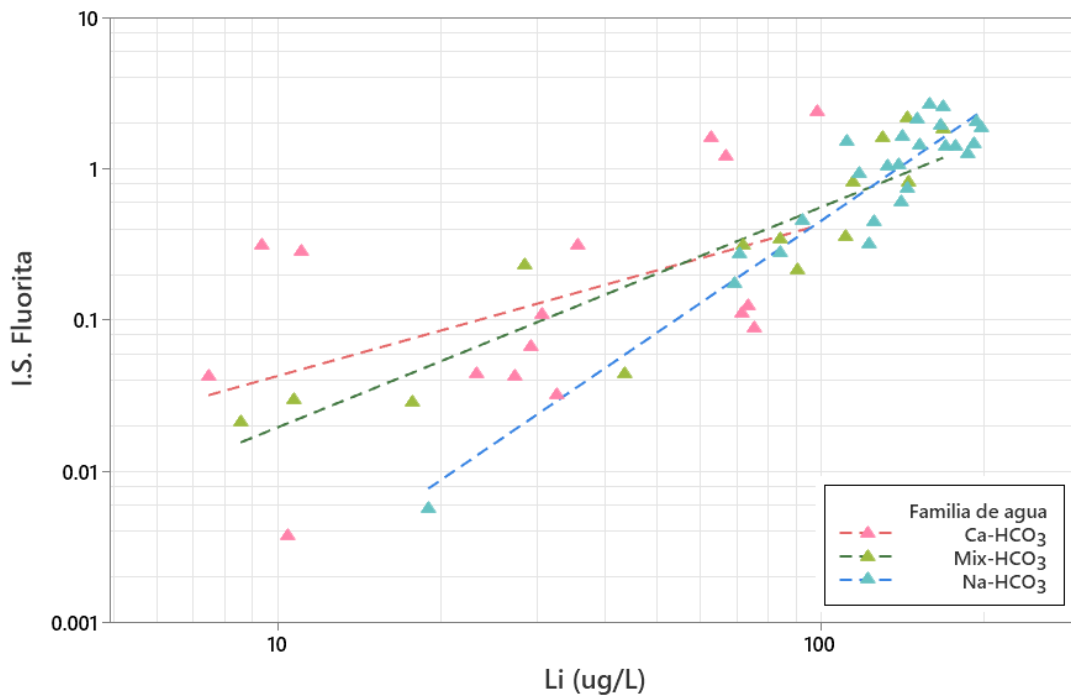


Figura 60. Índice de saturación de la fluorita y la concentración de litio (pozos).

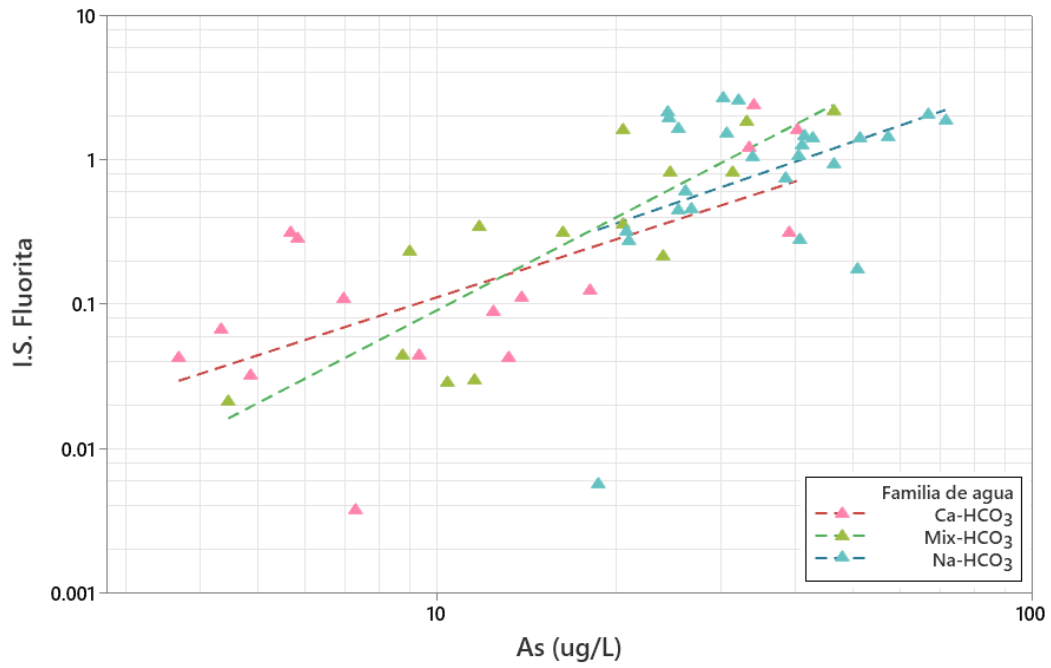


Figura 61. Índice de saturación de la fluorita y la concentración de arsénico (pozos).

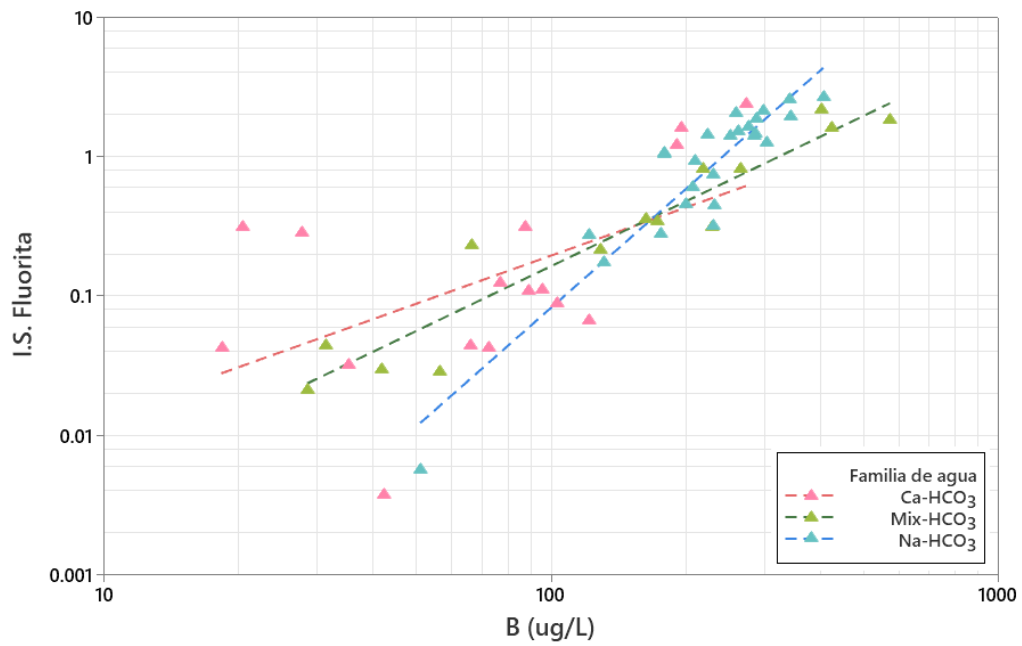


Figura 62. Índice de saturación de la fluorita y la concentración de boro (pozos).



7.8 ESPECIE ACUOSA ESTABLE DEL FLUORURO

A través de diagramas como el de Eh-pH y de especiación, se puede determinar la especie acuosa estable en el agua subterránea. El total de las muestras se ubican en la zona correspondiente al F^- y bicarbonatos, además de señalar un ambiente oxidante (Figura 63).

Esta misma cuestión es confirmada en ambos diagramas de especiación (Figura 64), que se realizaron a partir de la información de dos pozos hacia El Sauz. Éstos reúnen información de la concentración de fluoruro (mg/L) y el pH. Ambos puntos muestran un resultado semejante. Los gráficos representan las muestras C-35 y C-36, los cuales poseen concentraciones de fluoruro muy cercanos a 5 mg/L.

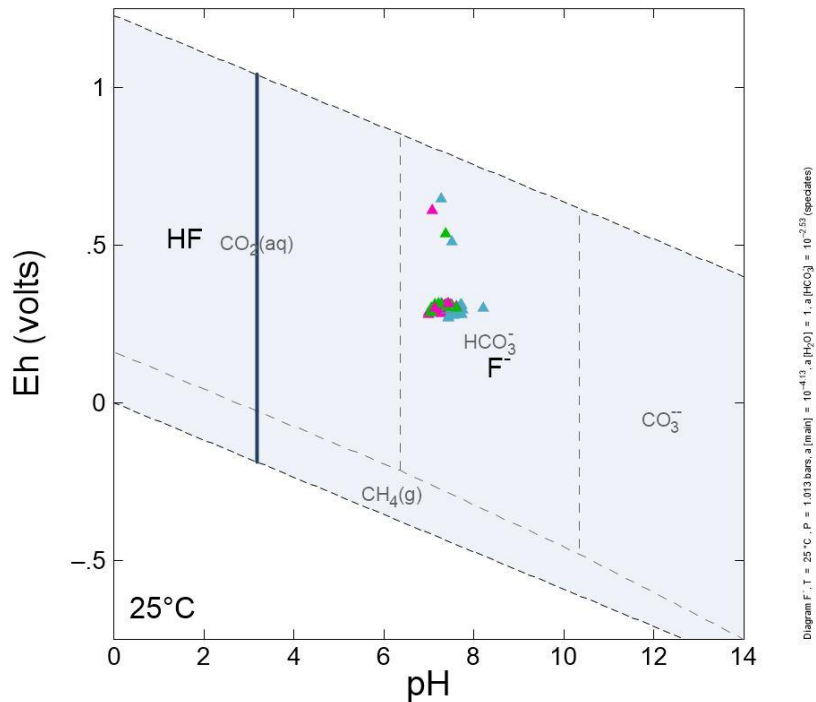


Figura 63. Diagrama Eh-pH.

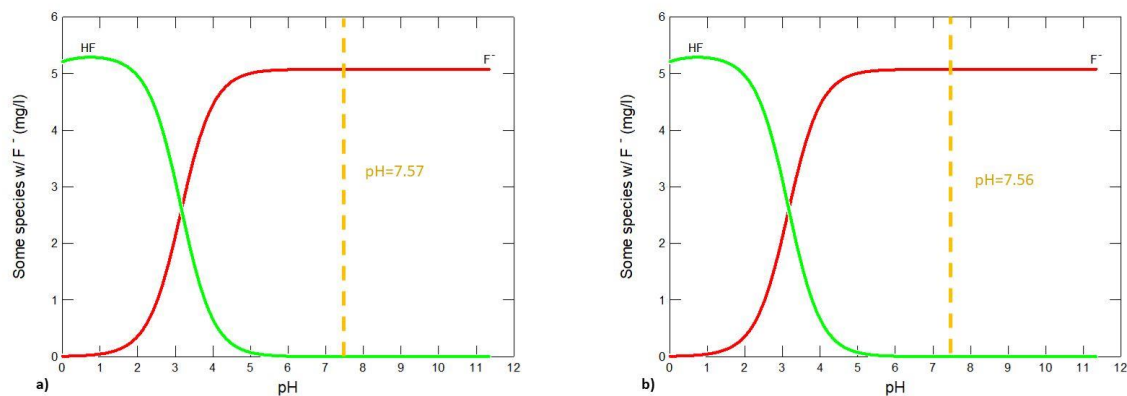


Figura 64. Diagramas de especiación para una concentración de fluoruro (F^-). (a) Muestra C-35 [4.96 mg/L] y (b) muestra C-36 = [4.99 mg/L], a 1 atm de presión. Haciendo uso del programa *Geochemist's Workbench*, con la aplicación de *React*.

7.9 CONTROLES DE SOLUBILIDAD CON RESPECTO AL FLUORURO

La concentración máxima de los componentes de un mineral dado está limitada por la solubilidad del mismo (Appelo & Postma, 2005). El aumento de fluoruro en el agua puede alcanzar un punto de saturación respecto a la fluorita (CaF_2). Es decir que, al llegar a tal punto, la relación entre el calcio y el fluoruro será negativa, y positiva entre el HCO_3^- y el F^- , beneficiando a la solubilidad de éste último (Huizar-Álvarez *et al.*, 2016).

Como resultado de esta relación, se indica que la presencia de fluoruro en el agua subterránea es controlada por la solubilidad de la fluorita; donde el calcio es controlado por la solubilidad de la calcita ($CaCO_3$) y de la fluorita (CaF_2). Al momento en el que el agua se satura respecto a la calcita, el calcio precipita como carbonato, eliminando parte de éste y disminuyendo su concentración. La baja concentración de calcio favorece al incremento de fluoruro en el agua subterránea.

El diagrama de estabilidad de la fluorita (Figura 65) resalta la correlación negativa entre ambos iones. La concentración de fluoruro presente en el agua de carácter bicarbonatado sódico es un indicador de su flujo por el medio félsico fracturado (principalmente), del cual obtiene dicho ion y por el cual tiende al equilibrio en algunas



muestras. La interacción de las otras dos familias con el material de relleno y rocas ígneas de diversas composiciones, en un flujo preferentemente local-intermedio, las mantiene en un estado de subsaturación.

Sin embargo, muestras de tipo cálcico están cerca del equilibrio-sobresaturación (valores elevados de F), indicando un posible componente vertical de flujo debido a la extracción, es decir, la existencia de una mezcla de agua de dos sistemas (Huizar-Álvarez *et al.*, 2016). O bien, que la extracción de agua subterránea induzca el flujo a través de las rocas volcánicas, adquiriendo el fluoruro (Cardona *et al.*, 2018).

El calcio en el agua subterránea tiene diferentes fuentes según la roca por la que circula. En los gráficos de la descripción de un barreno dentro del área de estudio, Estrada-García (2022) identificó en los primeros 80 m de profundidad la existencia de alrededor de 7% de calcita y 22% en una zona de 80 a 310 m de profundidad. En una tercera zona, de 310 a 400 m de profundidad, la calcita se encontró como relleno de vesículas en andesitas.

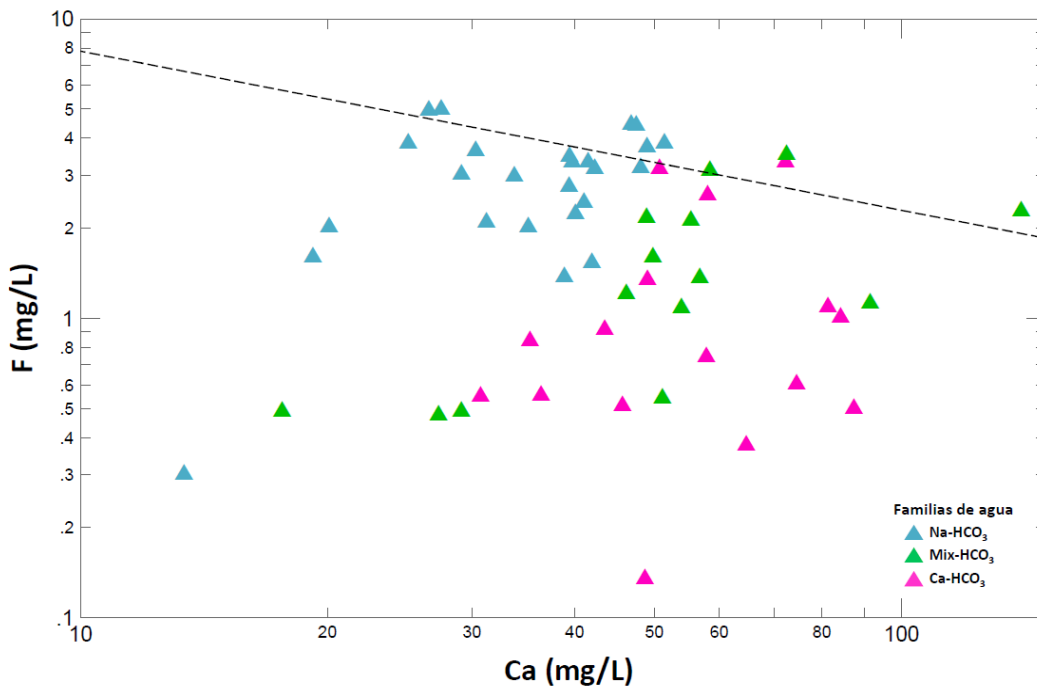


Figura 65. Diagrama de estabilidad de la fluorita.



7.10 MODELO GEOQUÍMICO CONCEPTUAL PARA EL FLUORURO DISUELTO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA

El modelo representa la movilización del agua subterránea a través de los sistemas acuíferos, consiste en la integración de los datos fisicoquímicos obtenidos tanto en campo, como en laboratorio, así como los aspectos geológicos y piezométricos.

Se delimitaron las áreas donde se desarrollan los diferentes tipos de agua, según su composición (Figura 66). Aunado a esto se incorporaron las líneas de sección, así como las direcciones de flujo y la elevación del nivel estático, con lo que se logró desarrollar las secciones hidrogeoquímicas.

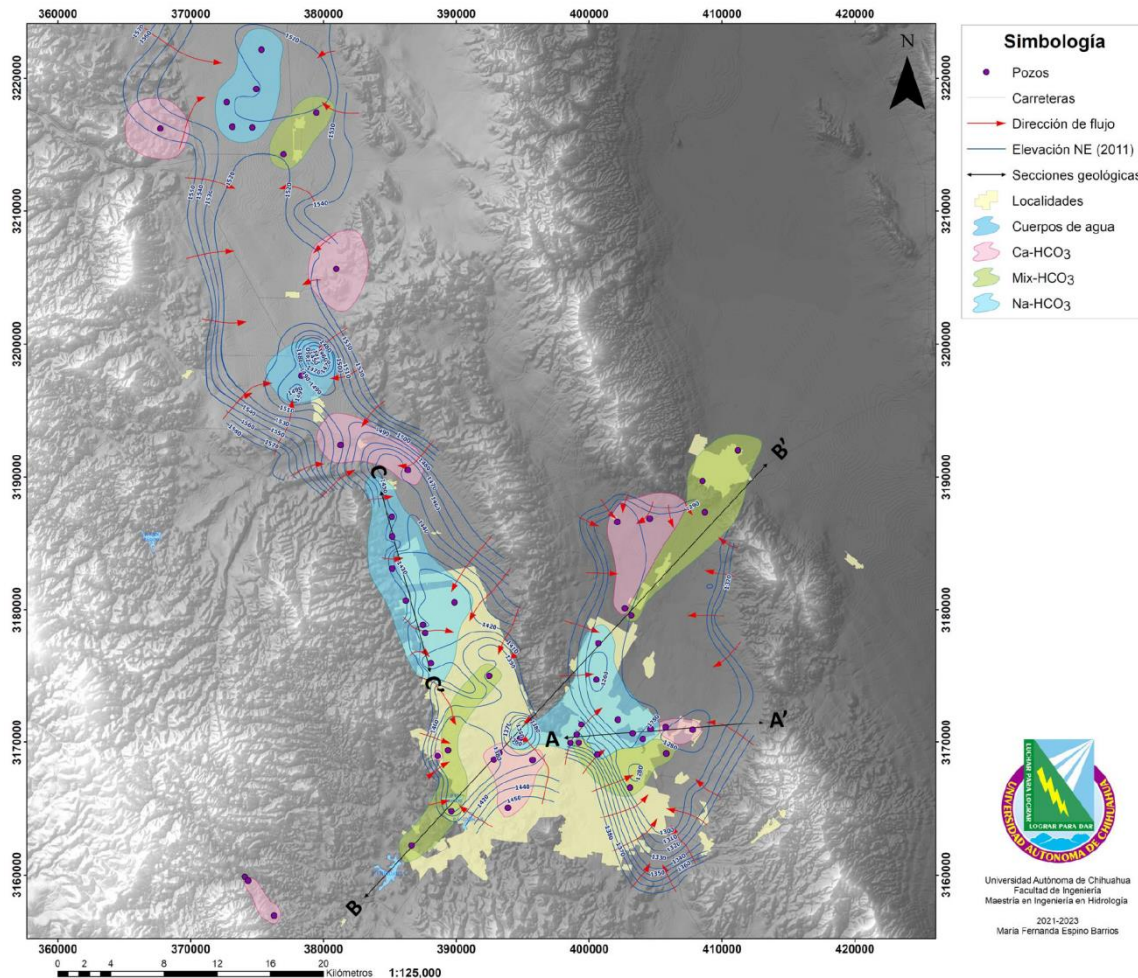


Figura 66. Modelo conceptual en planta. Distribución de familias y piezometría.



La sección hidrogeoquímica A-A' inicia desde el extremo sur de la sierra Nombre de Dios, con dirección N85°E hasta llegar a las sierras San Ignacio y Santo Domingo, atravesando el este de la ciudad de Chihuahua. La sección muestra la presencia de los tres tipos de agua: sódico, mixto y cálcico (bicarbonatadas).

En la sierra Nombre de Dios la composición del agua es bicarbonatada sódica y mixta, cuya circulación es a través de un medio ígneo fracturado félsico-intermedio. Las concentraciones de F y Li en los primeros (2) pozos sugiere que el agua que extraen pertenece a un flujo de tipo regional y el tercero a uno intermedio. En la parte central de la cuenca, el agua es de carácter bicarbonatado sódico (flujo intermedio) y cálcico (flujo local), donde los aprovechamientos atraviesan material de relleno, esencialmente. El cambio de composición podría estar ligado a un posible aporte de calcio de las rocas sedimentarias localizadas en las sierras hacia el final de esta sección (Figura 67).

La concentración (meq/L) de parámetros como el fluoruro, litio, sodio y uranio es mayor en la porción de la sierra Nombre de Dios y proyecta una disminución gradual al cambiar la circulación del agua de un medio fracturado a uno granular, en dirección a la parte central de la sección. Por el contrario, la concentración de calcio aumenta en dicha porción. La alcalinidad, temperatura y conductividad eléctrica tienen una tendencia general a disminuir.

La sección hidrogeoquímica B-B' inicia desde el suroeste del área de estudio con un rumbo N43°E. Ésta atraviesa Labor de Terrazas, el centro de la ciudad de Chihuahua, la sierra Nombre de Dios, La Mesa, hasta llegar a Juan Aldama (Figura 68). Los pozos en Labor de Terrazas son de tipo bicarbonatado mixto y se han relacionado a un flujo local a través de tobas riolíticas-andesíticas y brechas andesíticas. En el valle de Chihuahua se determinó la composición química de tres muestras de agua. Dos de ellas tienen una composición bicarbonatada cálcica y transitan a través de un medio granular compuesto por conglomerados; el tercer pozo (Na-HCO₃), de mayor profundidad, atraviesa el material granular y alcanza el medio fracturado (riolitas y calizas). En la porción de Tabalaopa-La



Mesa-Aldama la composición del agua es Na-HCO₃ (andesitas y tobas riolíticas) y Mix-HCO₃ – Ca-HCO₃ – Mix-HCO₃ (conglomerado, arenas-limos). La comparación de Li-F en estos puntos determinó un flujo intermedio.

La concentración de F, Li, Na y U exhiben una oscilación semejante a lo largo de toda la sección. La alcalinidad y la conductividad aumentan hacia el último punto, mientras que la temperatura disminuye.

La sección hidrogeoquímica C-C' es una representación de una zona de recarga en su totalidad, se desarrolla a lo largo de una porción del Bloque Calera-El Nido, con un rumbo N15°W. En toda esta sección predominan las rocas extrusivas de composición félsica y agua de tipo bicarbonatada sódica. Más del 50% de los puntos extraen agua de un flujo intermedio y el resto de uno regional.

Debido a la homogeneidad del medio por el que circula el agua, desde el punto de vista litológico, las concentraciones de Ca, F, Li, Na y U son equiparables (Figura 69). La temperatura y la conductividad eléctrica tienen una tendencia a aumentar, mientras que la alcalinidad disminuye.

De acuerdo con las evaluaciones y análisis realizados en capítulos anteriores, se determinó que el agua subterránea evoluciona desde las sierras, que representan las zonas de recarga, hacia las zonas de descarga. Conforme el flujo avanza en trayectoria dentro del sistema, características como la conductividad eléctrica aumenta, debido al incremento de las sales disueltas (STD). Esto es confirmado por la caracterización de la muestra de lluvia y la de los pozos, los cuales varían en composición. Los diferentes tipos de agua tienen una amplia distribución al interior de la zona delimitada.

La composición química del agua subterránea está dada por diferentes procesos químicos, entre los cuales se encuentra la disolución mineral, la precipitación, desorción, entre otros. A través de las secciones hidrogeoquímicas y el análisis de distribución de los puntos muestreados, se ha identificado la presencia de mayor concentración de fluoruro, principalmente en rocas ígneas extrusivas félsicas (Figura 70).

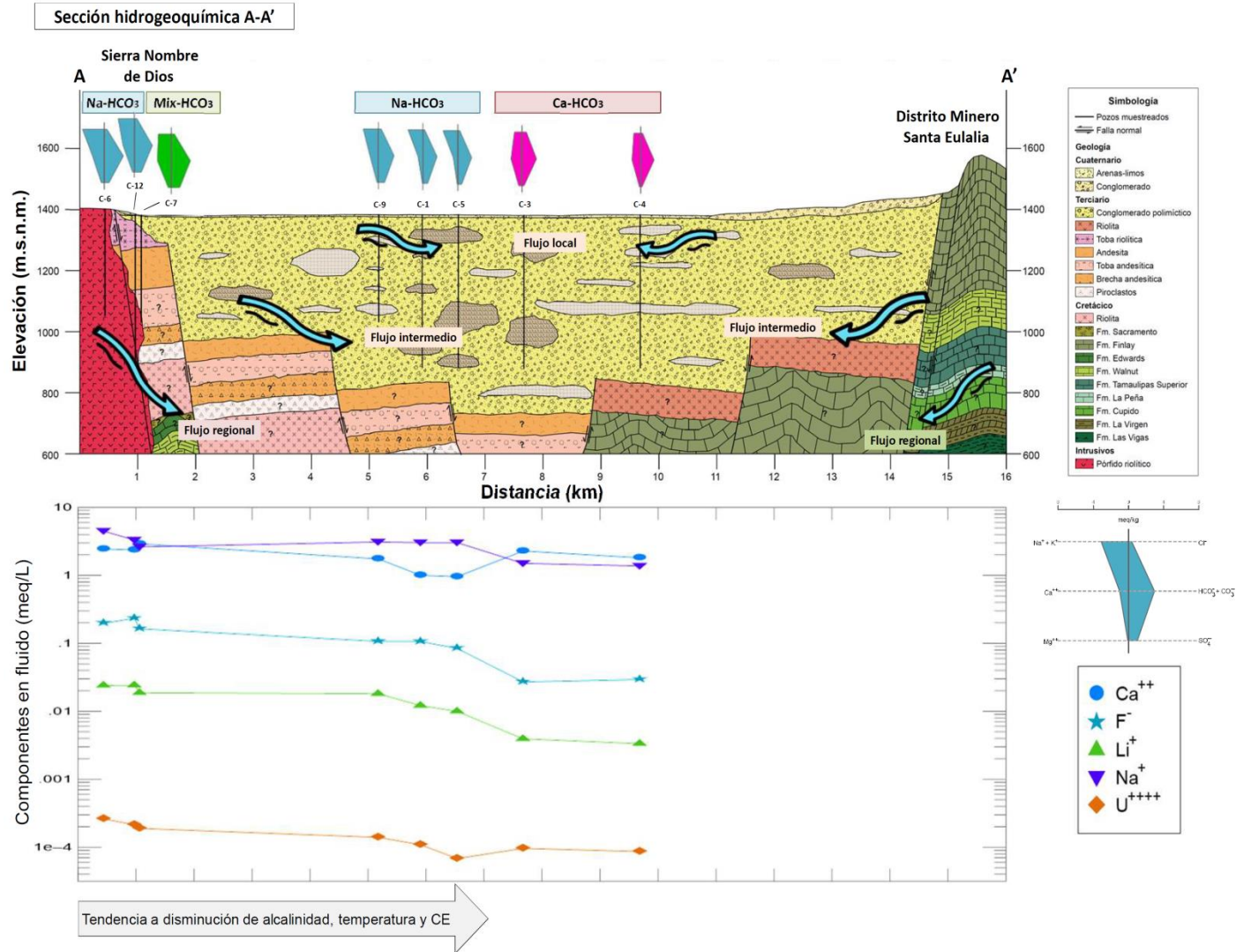


Figura 67. Sección hidrogeológica A-A'.

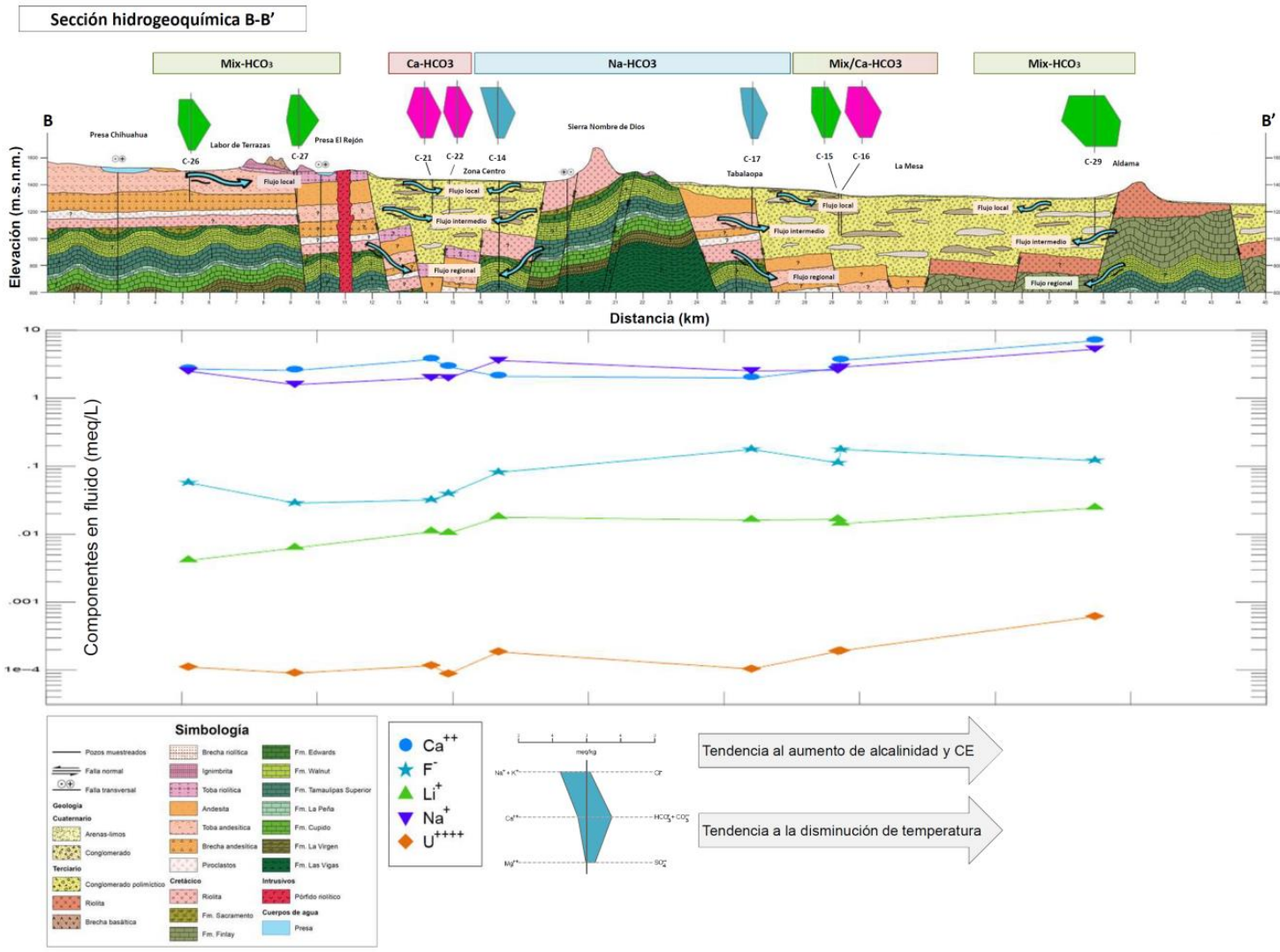


Figura 68. Sección hidrogeoquímica B-B'.

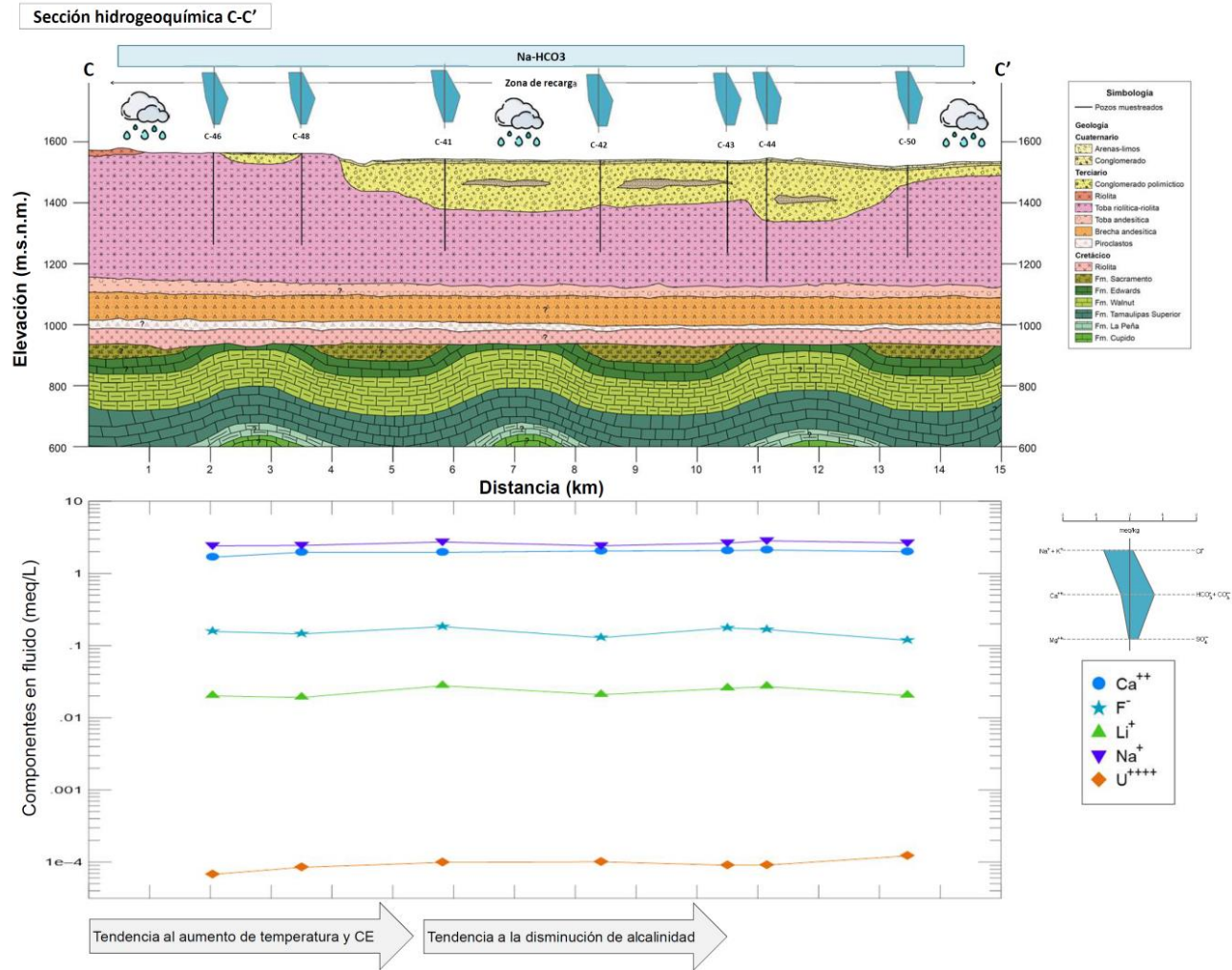


Figura 69. Sección hidrogeoquímica C-C'.

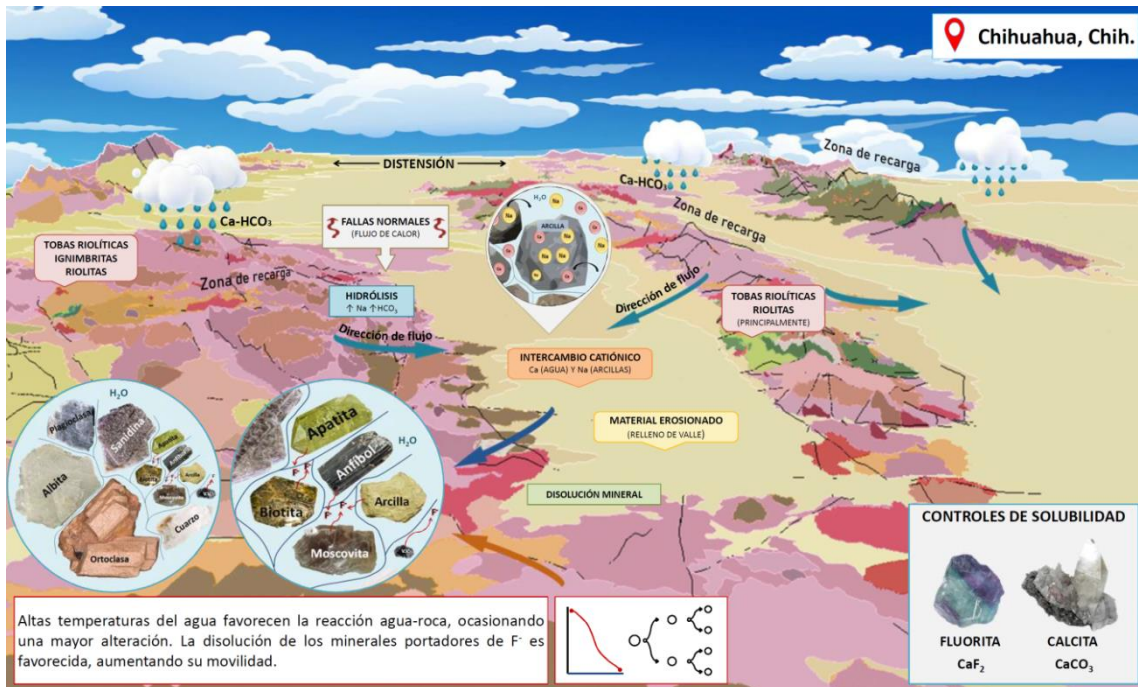


Figura 70. Modelo conceptual del enriquecimiento de fluoruro.

La geología dentro del área de estudio se compone de material de relleno de fosas tectónicas; rocas ígneas extrusivas del Cretácico-Neógeno, principalmente de composición félsica (con minerales portadores de F⁻); y rocas sedimentarias del Cretácico. Tras un episodio de distensión que inició durante el Oligoceno, se formaron *grabens* delimitados por fallas normales con una orientación preferencial NW-SE. Al infiltrarse el agua meteórica adquiere la característica fisicoquímica clasificada como bicarbonatada cálcica (Ca-HCO₃). El modelo hidrogeoquímico señala que el origen del fluoruro se encuentra en las rocas ígneas félsicas, a través del intemperismo químico. La hidrólisis de minerales como la albita y el vidrio volcánico, fomenta la liberación de sodio y bicarbonato, cambiando la composición del agua a bicarbonatada sódica (Na-HCO₃), lo cual permite la disolución de minerales que contienen fluoruro. El flujo del agua subterránea de tipo Na-HCO₃ está bajo la influencia estructural y geológica de la región, ya que su circulación es a través de las rocas ígneas descritas y parte de su captación es en pozos en las inmediaciones de fallas normales NW-SE (posibles conductos hidrotermales). A través de geotermómetros



se han estimado temperaturas en el reservorio superiores a los 50°C, lo que aumenta la velocidad de disolución de minerales que contienen F⁻ y la movilización de éste. La disolución del fluoruro es controlada por la solubilidad de la fluorita (CaF₂) y de la calcita (CaCO₃).

7.11 COMPARACIÓN CON OTROS ESTUDIOS

Los resultados del estudio actual han sido comparados con los resultados de trabajos previos de diferentes autores (Tabla 24). La recopilación bibliográfica abarca diferentes escalas: local (Chihuahua), nacional e internacional. Los lugares seleccionados, nacional e internacionalmente, guardan semejanzas geológicas con la actual zona de estudio; si bien la litología propia de cada lugar puede variar, destacan las rocas ígneas de composición félsica, con las que se ha identificado una importante relación. En cada uno de estos estudios han resaltado la correlación que mantiene la elevada concentración de fluoruro con la temperatura y el agua tipo bicarbonatada sódica; además de presentar minerales portadores iguales y/o semejantes, al igual que los controles de solubilidad.

Tabla 24. Comparación de estudio actual y estudios previos.

Estudio	Lugar	[F ⁻] en mg/L	T (°C)	Minerales	Correl. (r>0.5)	Ctrl. Solub.
Actual	CHIH	0.14 - 4.99	19.6 - 33.9	Biotitas, anfíboles, vidrio volcánico, feldespatos (datos bibliográficos)	T(0.63) Na(0.60) As(0.81) Hg(0.69) B(0.78) W(0.75) Cs(0.74) Ge(0.82) Li(0.87) Mo(0.95) Rb(0.77)	Fluorita Calcita
(Fantong <i>et al.</i> , 2010)	CMR	0.19 - 15.20	26.0 - 35.0	Fluorapatita, fluorita, fluoropiromorfita, fluorfogopita	0.71(Na/Na+Ca)	Fluorita
(Fernández-Franco, 2020)	CHIH	0.10 - 5.22	20.15 - 34.40	Vidrio volcánico, anfíboles, apatitas	Li(0.65) As(0.65) T(0.5)	Fluorita

Nota: CHIH=Chihuahua; CMR=Camerún.



Continuación de **Tabla 24.** Comparación de estudio actual y estudios previos.

Estudio	Lugar	[F-] en mg/L	T (°C)	Minerales	Correl. (r>0.5)	Ctrl. Solub.
(Mahlknecht <i>et al.</i> , 2008)	CHIH	0.023 - 4.56	19.3 - 29.5 (>80)	No menciona	No menciona	No menciona
(Ingeniería de Evaluación y Prospección S.A. de C.V., 1996)	CHIH	0.10 - 5.20	21.0 - 31.5	Vidrio volcánico, biotitas	No menciona	Fluorita Calcita
(Reyes-Gómez <i>et al.</i> , 2013)	CHIH	1.06 - 4.55	12.9 - 26.40	Fluorapatita	As(0.720)	No menciona
(Reyes-Gómez <i>et al.</i> , 2015)	CHIH	1.15 - 6.76	No menciona	No menciona	As(0.55)	No menciona
(Bianchini <i>et al.</i> , 2020)	ETH	1.50 - 45.20	17.0 - 80.0	Vidrio volcánico, anfíboles, fluorapatita	0.46-0.80(As)	Fluorita
(Knappett <i>et al.</i> , 2018)	GTO	0.20 - 15.50	14.7 - 4.5	Villiaumita, fluorita, fluorapatita	Na(0.84) B(0.83) HCO ₃ (0.55) pH(0.51)	Fluorita
(Ortega-Guerrero, 2009)	GTO	1.50 - 16.00	14.0 - 47.0	Fluorita, topacio, biotita	T(0.63) Ca(-0.53) Mg(-0.65) K(-0.67) Cl(0.83) Ba(-0.64) Cs(0.94) Sr(-0.59) Br(0.63)	Fluorita
(Ocampo-Astudillo <i>et al.</i> , 2020)	JAL	0.00 - 4.90	No menciona	Fluorita, biotita, moscovita	No menciona	No menciona
(Huizar-Álvarez <i>et al.</i> , 2016)	MOR	0.20 - 1.90	22.3 - 33.31	Biotita, anfíboles, flogopita, fluorita	Na(0.594) NO ₃ (0.511)	Fluorita
(Cardona <i>et al.</i> , 2018)	SLP	0.36 - 3.22	24.1 - 36.8	Topacio, fluorapatita	Na U Tb Dy Rb Nb Cs Er Yb Lu Th W	Fluorita Calcita
(Navarro <i>et al.</i> , 2017)	ZAC	0.35 - 3.60	21.0 - 34.7	No menciona	As	Fluorita

Nota: CHIH=Chihuahua; ETH=Etiopía; GTO=Guanajuato; JAL=Jalisco; MOR=Morelos; SLP=San Luis Potosí; ZAC=Zacatecas.



Capítulo 8: Conclusiones y recomendaciones

8.1 CONCLUSIONES

- La geología dentro del área de estudio incluye rocas ígneas del Cretácico-Neógeno, rocas sedimentarias del Cretácico, así como material de relleno de las cuencas tectónicas presentes. Desde el punto de vista estructural, la orogenia Laramide y la Provincia de Sierras y Cuencas fueron los eventos más relevantes.
- El medio poroso y el medio fracturado figuran como los principales medios por los que circula el agua subterránea. El *primero* es donde se encuentran preferencialmente los aprovechamientos, y el *segundo*, funge principalmente como zona de recarga.
- La campaña de muestro incluyó muestras de agua de norias, presas, manantiales, lluvia y pozos. Los parámetros evaluados en campo abarcaron temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH y potencial óxido-reducción.
- En un análisis global, la temperatura presentó un rango de entre 13.70 y 33.90 °C. El oxígeno disuelto tuvo valores de 0.42 a 9.79 mg/L. La variación entre la conductividad eléctrica registrada en los puntos era amplia, puesto que el valor mínimo fue de 47.70 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y la máxima de 1450 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que claramente mantenía relación con los sólidos totales disueltos. Por otro lado, el pH no mostró gran variación, manteniendo una condición casi neutral-alcalina (6.53 – 8.49). Por último, el ORP abarcó valores desde -10.40 a 421.70 mV.
- La condición de electroneutralidad demostró la precisión de los análisis realizados. El 55.56% de las muestras presentaron un rango de error inferior al $\pm 2\%$; el 41.27% se delimitó en un rango de ± 2 a $\pm 5\%$ de error; solo 2 muestras excedieron el $\pm 5\%$ de error, sin sobrepasar el $\pm 10\%$.
- La caracterización química (Diagrama de Piper), determinó la existencia de tres familias: bicarbonatada cálcica (23 muestras), bicarbonatada mixta (15 muestras) y bicarbonatada sódica (25 muestras).



- Las muestras de agua tipo bicarbonatada sódica fueron exclusivamente de pozos; la bicarbonatada mixta se distribuía en pozos y una presa, mientras que la cálcica en pozos, norias, manantiales, presas y lluvia.
- El fluoruro presenta coeficientes de correlación altos con parámetros como la temperatura, Na, Rb, Mo, Li, Cs, W, B, Hg, Ge y As, tanto de manera global (63 muestras) como en el grupo I (55 muestras de pozos).
- El análisis estadístico y los diagramas de cajas y bigotes, tanto por familia como por aprovechamiento-familia, proporcionó información importante sobre la relación de la concentración de fluoruro y los diferentes grupos establecidos, lo cual también se vio reflejado en los elementos que mantienen una correlación importante con dicho ión.
- Si bien no todos los aprovechamientos muestreados tienen como fin el abastecimiento de agua potable (8), la comparación con la Norma Oficial Mexicana 127 se realizó para el total de las muestras (63). Del 40 al 51% de las muestras excedieron el LMP de arsénico y fluoruro; mientras que menos del 5% sobrepasó los límites de manganeso, bario y nitratos como N.
- El diagrama de Wilcox (porcentaje de sodio) determinó que el agua muestreada tiene una clasificación de excelente a buena; mientras que el de Riesgo de Acumulación de Sodio demostró una baja concentración sódica, con rangos de salinidad variables.
- A través del intemperismo químico de minerales, p.e. feldespatos y vidrio volcánico, presentes en las rocas extrusivas, se libera sodio y bicarbonato, lo que disminuye la concentración de calcio en el agua (también a través de intercambio iónico). Durante este cambio de composición química a Na-HCO_3 se favorece la liberación del fluoruro de los minerales que lo contienen, como biotitas, vidrio volcánico y anfíboles.
- Las muestras de agua subterránea pertenecientes a la familia bicarbonatada sódica exhibieron altas concentraciones de fluoruro (promedio de 3.0 mg/L), además de una relación con la temperatura ($>25\text{ }^\circ\text{C}$); tal correlación se demostró a nivel espacial. Su flujo es a través de rocas volcánicas félsicas fracturadas (tobas, riolitas y secuencias



ignimbríticas) y es captada por pozos en las inmediaciones de fallas normales de dirección NW-SE, relacionadas a la Provincia de Sierras y Cuencas.

- La comparación de las concentraciones de litio ($\mu\text{g/L}$) y fluoruro (mg/L) permitió la agrupación de las muestras según el tipo de flujo al que pertenecía. Se identificaron tres flujos: local, intermedio y regional. La composición Ca/Mix- HCO_3 predomina en el flujo local ($\text{Li} < 45 \mu\text{g/L}$ y $\text{F} < 1.4 \text{ mg/L}$), donde el agua subterránea transita por material de relleno, ígneo félsico-intermedio y calizas. En el flujo intermedio, predominan las familias Na/Mix- HCO_3 , vinculándose con material de relleno, tobas, secuencias ignimbríticas y andesitas, principalmente. Por último, en el flujo regional la composición del agua es Na- HCO_3 , donde las concentraciones de Li superan los $150 \mu\text{g/L}$ y las de fluoruro los 3.10 mg/L ; circula especialmente a través de rocas ígneas félsicas (tobas, pórfido riolítico, secuencias ignimbríticas y riolitas) y material de relleno.
- La temperatura del agua a profundidad es controlada por los geotermómetros de calcedonia y K-Mg de Giggenbach, determinada en un rango de 40 a 60°C . Altas temperaturas permitirían una mayor velocidad de reacción de ciertos procesos, aumentando la disolución de minerales y, por ende, la movilidad del fluoruro.
- La profundidad aparente de circulación se estimó en 1135 m considerando solamente el gradiente geotérmico promedio; sin embargo, los minerales radiactivos presentes en las rocas volcánicas tendrían su aportación de energía a partir de las reacciones de decaimiento, por lo que esta profundidad podría ser menor.
- El Análisis de Componentes Principales relacionó los resultados obtenidos a procesos de interacción agua-roca, como alteración/hidrólisis de minerales de silicato. También se considera la disolución, desorción alcalina (intercambio catiónico), además de señalar una posible mezcla de agua subterránea somera-profunda con fluidos geotermales y un origen geogénico del fluoruro en el agua subterránea.
- Estudios previos sugieren que minerales del grupo de las micas y anfíboles podrían estar aportando F al agua subterránea.



- El índice de saturación de la fluorita muestra la influencia por parte de la concentración de elementos como el litio, boro y arsénico, especialmente en el agua bicarbonatada sódica. Las altas concentraciones de estos elementos podría indicar el ascenso de agua profunda (mayor temperatura) por medio de las fallas (sistema de conductos) y su mezcla con agua de menor profundidad.
- Los diagramas de Eh-pH y de especiación, demostraron que la especie acuosa estable en el agua es el F^- , en un ambiente principalmente oxidante.
- La fluorita y la calcita actúan como controles de solubilidad, debido a la correlación negativa entre el Ca y el F^- . A través del diagrama de estabilidad de la fluorita, se demuestra el control de éstos iones. El calcio, su vez, está controlado por la solubilidad o precipitación de los carbonatos, que aporta o disminuye (respectivamente) la concentración de Ca en el agua.
- Las secciones hidrogeoquímicas muestran la relación de los factores geológicos, estructurales e hidroquímicos, de manera general (sección) y puntual (pozo). Esta evaluación más detallada permite visualizar el comportamiento de los componentes según el medio en el que se encuentran y como se relacionan con otros puntos de interés.
- La comparación de los datos obtenidos en este proyecto demuestra la similitud de los resultados de otros estudios a nivel local, nacional e internacional.



8.2 RECOMENDACIONES

- Ampliar la red de muestreo y continuar con una evaluación periódica de parámetros fisicoquímicos, caracterización y modelación.
- Profundizar en la relación de la composición química del agua con el tipo de flujo y el tipo de material por el que circula.
- Se recomienda realizar un análisis estadístico más profundo, que permita llevar la evaluación a un nivel de significancia. Se sugiere un análisis de regresión y de pruebas de hipótesis.
- Para un trabajo futuro, se recomienda un muestreo y caracterización detallada de las rocas dentro del área de estudio, para un mayor conocimiento mineralógico y geoquímico que permita la identificación de minerales cuya solubilidad aporte iones de interés.



Referencias

- Acosta, J., & Salvadori, J. (2017). *Evaluación de la calidad de agua para riego mediante el empleo de criterios actualizados*.
- Alarcón-Herrera, M., Bundschuh, J., Nath, B., Nicolli, H., Gutierrez, M., Reyes-Gomez, V., Nuñez, D., Martín-Dominguez, I., & Sracek, O. (2012). Co-occurrence of arsenic and fluoride in groundwater of semi-arid regions in Latin America: Genesis, mobility and remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 262, 960–969. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.08.005>
- Alarcón-Herrera, M., Martín-Alarcón, D., Gutiérrez, M., Reynoso-Cuevas, L., Martín-Domínguez, A., Olmos-Márquez, M., & Bundschuh, J. (2020). Co-occurrence, possible origin, and health-risk assessment of arsenic and fluoride in drinking water sources in Mexico: Geographical data visualization. *Science of the Total Environment*, 698, 134168. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134168>
- Ameur, M., Hamzaoui-Azaza, F., Cheikha, L. Ben, & Gueddari, M. (2019). Geochemistry of high concentrations of fluoride in groundwater at Oued Rmel aquifer (North-eastern Tunisia), and risks to human health from exposure through drinking water. *Environmental Earth Sciences*, 78(6), 0. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8189-0>
- Amini, M., Mueller, K., Abbaspour, K. C., Rosenberg, T., Afyuni, M., Møller, K. N., Sarr, M., & Johnson, C. A. (2008). Statistical modeling of global geogenic fluoride contamination in groundwaters. *Environmental Science and Technology*, 42(10), 3662–3668. <https://doi.org/10.1021/es071958y>
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). Applied groundwater modeling — Simulation of flow and advective transport. In *Academic Press*. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(92\)90251-p](https://doi.org/10.1016/0022-1694(92)90251-p)
- Anim-Gyampo, M., Anornu, G. K., Appiah-Adjei, E. K., & Agodzo, S. K. (2019). Quality and health risk assessment of shallow groundwater aquifers within the Atankwidi basin of Ghana. *Groundwater for Sustainable Development*, 9(December 2018), 100217. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100217>
- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). Geochemistry, groundwater and pollution. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90585-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90585-1)
- Araiza-Pérez, J. M., & Grajeda-Carrera, R. (1987). *Estudio geológico de la cuenca Alta del Río Chuvíscar, municipio de Chihuahua*.
- Badilla-Cruz, R., & Aponte-Barrera, M. (1989). *Estudio geológico y de caracterización de los yacimientos El Nopal I, Las Margaritas y El Puerto III, del Distrito Minero de Peña Blanca, Chih.* http://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/UramexWeb/T080000BACR0001_01.pdf
- Barranquero, R. S., Varni, M., Vega, M., Pardo, R., & Ruiz De Galarreta, A. (2017).



- Arsenic, fluoride and other trace elements in the Argentina Pampean plain. *Geologica Acta*, 15(3), 187–200. <https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2017.15.3.3>
- Bianchini, G., Brombin, V., Marchina, C., Natali, C., Godebo, T. R., Rasini, A., & Salani, G. M. (2020). Origin of fluoride and arsenic in the main Ethiopian rift waters. *Minerals*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/min10050453>
- British Geological Service. (2000). Water Quality Fact Sheet: Iodine. *Water Quality Fact Sheet*. <https://washmatters.wateraid.org/es/publicaciones/parametros-inorganicos-decalidad-del-agua-yodo>
- Burillo, J. C., Ballinas, L., Burillo, G., Guerrero-Lestarjette, E., Lardizabal-Gutierrez, D., & Silva-Hidalgo, H. (2021). Chitosan hydrogel synthesis to remove arsenic and fluoride ions from groundwater. *Journal of Hazardous Materials*, 417(April 2020), 126070. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126070>
- Camacho-Angulo, F. (1987). *Estudios geológicos regionales y semidetalle alrededor del sitio de Barra El Tordo, Tamaulipas*. <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/index.php/component/content/article/259-sitio/articulos/tercera-epoca/4802/1371-4802-4-camacho>
- Cameron, K. L., Nimz, G. J., Kuentz, D., Niemeyer, S., & Gunn, S. (1989). Southern Cordilleran Basaltic Andesite suite, southern Chihuahua, Mexico: a link between Tertiary continental arc and flood basalt magmatism in North America. *Journal of Geophysical Research*, 94(B6), 7817–7840. <https://doi.org/10.1029/JB094iB06p07817>
- Cardona, A., Banning, A., Carrillo-Rivera, J. J., Aguillón-Robles, A., Rúde, T. R., & Aceves de Alba, J. (2018). Natural controls validation for handling elevated fluoride concentrations in extraction activated tóthian groundwater flow systems: San Luis Potosí, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 77(4), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7273-1>
- Carrillo-Esper, R., Carrillo-Córdova, J. R., & Carrillo-Córdova, L. D. (2008). Modelo físicoquímico del equilibrio ácido-base. Conceptos actuales (2^a de tres partes). *Medigraphic Artemisa*, 51(4), 156–158. <https://www.medigraphic.com/pdfs/facmed/un-2008/un084f.pdf>
- Carrillo-Rivera, J., Cardona, A., & Edmunds, W. M. (2002). Use of abstraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosí Basin, Mexico. *Journal of Hydrology*, 261(1–4), 24–47. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00566-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00566-2)
- CONABIO. (1998). *Climatología*. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONABIO. (2007). *Regiones hidrológicas, escala 1:250000, República Mexicana*. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONAGUA. (2019). *Calidad del agua en México*. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>



- CONAGUA. (2020a). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Chihuahua-Sacramento (0830), Estado de Chihuahua.*
- CONAGUA. (2020b). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuauhtémoc (0805), Estado de Chihuahua.* https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/chihuahua/DR_0805.pdf
- CONAGUA. (2020c). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero El Sauz-Encinillas (0807), Estado de Chihuahua.*
- CONAGUA. (2020d). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Tabalaopa-Aldama (0835), estado de Chihuahua.*
- Consejo de Recursos Minerales. (1994). *Monografía Geológico-Minera del Estado de Chihuahua* (Primera Ed).
- Das, N., Das, A., Sarma, K. P., & Kumar, M. (2018). Provenance, prevalence and health perspective of co-occurrences of arsenic, fluoride and uranium in the aquifers of the Brahmaputra River floodplain. *Chemosphere*, 194(January), 755–772. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.021>
- Departamento de Geociencias de la Universidad de Wisconsin-Madison. (2021). *The Basin-and-Range Province.*
- Dey, S., & Giri, B. (2016). Fluoride Fact on Human Health and Health Problems: A Review. *Medical & Clinical Reviews*, 02(01), 1–6. <https://doi.org/10.21767/2471-299x.1000011>
- Dobrzyński, D., Boguszevska-Czubara, A., & Sugimori, K. (2017). Hydrogeochemical and biomedical insights into germanium potential of curative waters: A case study of health resorts in the Sudetes mountains (Poland). *Environmental Geochemistry and Health*, 40(4), 1335–1375. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-0061-0>
- Edmunds, W. M., Cook, J. M., Darling, W. G., Kinniburgh, D. G., Miles, D. L., Bath, A. H., Morgan-Jones, M., & Andrews, J. N. (1987). Baseline geochemical conditions in the Chalk aquifer, Berkshire, U.K.: a basis for groundwater quality management. *Applied Geochemistry*, 2(3), 251–274. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(87\)90042-4](https://doi.org/10.1016/0883-2927(87)90042-4)
- Embaby, A., & Redwan, M. (2019). Sources and behavior of trace elements in groundwater in the South Eastern Desert, Egypt. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(11). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7868-3>
- Esparza-Delgado, M. del C. (2017). *Transferencia de calor de un sistema de climatización geotérmico de baja entalpía* [Centro de Investigación en Materiales Avanzados]. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/2593/1/TESIS000.pdf>
- Estrada-García, A. (2022). *Estratigrafía y geoquímica del agua subterránea en la región de Chihuahua, Chih., México* (Issue July) [Universidad Autónoma de San Luis Potosí]. https://www.researchgate.net/publication/361885150_Estratigrafia_y_geoquimica_del_agua_subterranea_en_la_region_de_Chihuahua_Chih_Mexico



- Fantong, W. Y., Satake, H., Ayonghe, S. N., Suh, E. C., Adelana, S. M. A., Fantong, E. B. S., Banseka, H. S., Gwanfogbe, C. D., Woincham, L. N., Uehara, Y., & Zhang, J. (2010). Geochemical provenance and spatial distribution of fluoride in groundwater of Mayo Tsanaga River Basin, Far North Region, Cameroon: Implications for incidence of fluorosis and optimal consumption dose. *Environmental Geochemistry and Health*, 32(2), 147–163. <https://doi.org/10.1007/s10653-009-9271-4>
- FAO. (2008). *Enciclopedia Inafed. Base referencial mundial del recurso suelo* (Vol. 03). <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM30veracruz/municipios/30044a.html%0Ahttp://www.fao.org/3/a-a0510s.pdf>
- Fernández-Franco, J. (2020). *Origen de las concentraciones de arsénico y fluoruro en el agua subterránea de acuíferos en rocas volcánicas: el caso de la ciudad de Chihuahua*. Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., & Bryan, S. (2005). Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 343–378. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a5>
- Fouillac, C., & Michard, G. (1981). Sodium/lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs. *Geothermics*, 10(1), 55–70. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(81\)90025-0](https://doi.org/10.1016/0375-6505(81)90025-0)
- Fournier, R. O. (1990). The interpretation of Na-K-Mg relations in geothermal waters. *Geothermal Resources Council*, 14.
- Fournier, R. O., & Truesdell, A. H. (1973). An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(5), 1255–1275. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90060-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90060-4)
- González-Arroyo, A., & Salas-Vázquez, G. (1996). *Estudio Geológico Integral a Semidetalle de la Asignación Minera Santa Isabel, Municipio de Mazapil, Estado de Zacatecas*, Tomo 1. 105. http://mapserver.sgm.gob.mx/informes/textos/T3296GOAA0001_01.pdf
- González-Horta, C., Ballinas-Casarrubias, L., Sánchez-Ramírez, B., Ishida, M. C., Barrera-Hernández, A., Gutiérrez-Torres, D., Zacarias, O. L., Jesse Saunders, R., Drobná, Z., Mendez, M. A., García-Vargas, G., Loomis, D., Stýblo, M., & Del Razo, L. M. (2015). A concurrent exposure to arsenic and fluoride from drinking water in Chihuahua, Mexico. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(5), 4587–4601. <https://doi.org/10.3390/ijerph120504587>
- Greenacre, M., Groenen, P. J. F., Hastie, T., Iodice-D’Enza, A., Markos, A., & Tuzhilina, E. (2022). *Principal component analysis*. https://www.researchgate.net/publication/366501387_Principal_component_analysis
- Haenggi, W. T. (2001). Tectonic history of the Chihuahua trough, Mexico and adjacent USA, Part II: the pre-Mesozoic setting. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*,



LIV, 28–66.

- Haldar, S. K. (2017). Platinum-Nickel-Chromium Deposits. In *Platinum-Nickel-Chromium Deposits* (pp. 1–35). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802041-8.00001-8>
- Henley, R. W., Truesdell, A. H., & Barton Jr., P. B. (1984). Fluid-mineral equilibria in hydrothermal systems. In *Reviews in Economic Geology* (pp. 32–36).
- Henry, C. D., & Aranda-Gómez, J. J. (2000). Plate interactions control middle-late Miocene, proto-Gulf and Basin and Range extension in the southern Basin and Range. *Tectonophysics*, 318(1–4), 1–26. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00304-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00304-2)
- Hobson, C., Kulkarni, H. V., Johannesson, K. H., Bednar, A., Tappero, R., Mohajerin, T. J., Sheppard, P. R., Witten, M. L., Hettiarachchi, G. M., & Datta, S. (2020). Origin of tungsten and geochemical controls on its occurrence and mobilization in shallow sediments from Fallon, Nevada, USA. *Chemosphere*, 260. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127577>
- Huizar-Álvarez, R., Carrillo-Rivera, J., & Juárez, F. (2016). Fluoruro en el agua subterránea: niveles, origen y control natural en la región de Tenextepango, Morelos, México. *Investigaciones Geográficas*, 2016(90), 40–58. <https://doi.org/10.14350/rig.47374>
- Husain, V., Nizam, H., Arain, & Murtaza, G. (2012). Arsenic and Fluoride Mobilization Mechanism in Groundwater of Indus Delta and Thar Desert, Sindh, Pakistan. *Int. j. Econ. Env. Geol.*, 3(1), 15–23.
- IGME. (2000). *La composición química de las aguas subterráneas naturales*. 33.
- INEGI. (2003). *Síntesis de Información Geográfica del Estado de Chihuahua*. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/esp/anol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825224332/702825224332_4.pdf
- INEGI. (2008). *Climatología*. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/#Descargas>
- INEGI. (2009). Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación: Escala 1:250 000: Serie III. *Inegi*, 77. <http://sedico.campeche.gob.mx/Volumes/archivos/diabetes0.pdf>
- INEGI. (2012). Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México*, 204.
- InfoAGRO. (2021). *Diagnóstico de aguas de riego*. https://www.infoagro.com/riegos/diagnostico_aguas.htm
- Ingeniería de Evaluación y Prospección S.A. de C.V. (1996). *Simulación hidrodinámica del acuífero de El Sauz-Encinillas, Chihuahua*.
- Instituto de Catálisis y Petroleoquímica. (2019). Espectroscopía De Emisión Atómica ICP-OES. *CSIC*. https://icp.csic.es/archivos/uapoyo/2020/Descripcion_ICP_02.pdf



- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2021). *Capítulo II. Caracterización ambiental de México y su correlación con la clasificación y la nomenclatura de las comunidades vegetales*.
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/421/cap2.html>
- JCAS, & IMTA. (2018). *Plan Estatal Hídrico 2040 de Chihuahua*.
- JCAS, UACH, CONAGUA, & JMAS. (2013a). *Evaluación de las fuentes actuales de abastecimiento a la ciudad de Chihuahua, estudio de factibilidad de fuentes alternas y anteproyecto de infraestructura hidráulica necesaria. Tomo 7*.
- JCAS, UACH, CONAGUA, & JMAS. (2013b). *Evaluación de las fuentes actuales de abastecimiento a la ciudad de Chihuahua, estudio de factibilidad de fuentes alternas y anteproyecto de infraestructura hidráulica necesaria. Tomo 8*.
- JCAS, UACH, CONAGUA, & JMAS. (2013c). *Evaluación de las fuentes actuales de abastecimiento a la ciudad de Chihuahua, estudio de factibilidad de fuentes alternas y anteproyecto de infraestructura hidráulica necesaria. Tomo 9*.
- Karingithi, C. W. (2009). Chemical geothermometers for geothermal exploration. *Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources*, 1–12.
- Kavanagh, L., Keohane, J., Cleary, J., García-Cabellos, G., & Lloyd, A. (2017). Lithium in the natural waters of the south east of Ireland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(6), 14–16. <https://doi.org/10.3390/ijerph14060561>
- Khair, A. M., Li, C., Hu, Q., Gao, X., & Wang, Y. (2014). Fluoride and arsenic hydrogeochemistry of groundwater at Yuncheng basin, Northern China. *Geochemistry International*, 52(10), 868–881. <https://doi.org/10.1134/S0016702914100024>
- Kim, S. H., Kim, K., Ko, K. S., Kim, Y., & Lee, K. S. (2012). Co-contamination of arsenic and fluoride in the groundwater of unconsolidated aquifers under reducing environments. *Chemosphere*, 87(8), 851–856. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.01.025>
- Kimambo, V., Bhattacharya, P., Mtalo, F., Mtamba, J., & Ahmad, A. (2019). Fluoride occurrence in groundwater systems at global scale and status of defluoridation – State of the art. *Groundwater for Sustainable Development*, 9(August 2018), 100223. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100223>
- Knappett, P. S. K., Li, Y., Hernandez, H., Rodriguez, R., Aviles, M., Deng, C., Piña, V., Giardino, J. R., Mahlke, J., & Datta, S. (2018). Changing recharge pathways within an intensively pumped aquifer with high fluoride concentrations in Central Mexico. *Science of the Total Environment*, 622–623, 1029–1045. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.031>
- Kumar, P. J. S. (2021). Groundwater fluoride contamination in Coimbatore district: a geochemical characterization, multivariate analysis, and human health risk perspective. *Environmental Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09521-w>



- Laboratorio de Técnicas Instrumentales UVA. (2021). *Espectroscopía de Plasma ICP-OES*. <https://laboratoriotecnicasinstrumentales.es/analisis-quimicos/espectroscopa-de-plasma-icp-oes>
- Leroy, J. L., & George-Aniel, B. (1992). Volcanism and Uranium Mineralizations: The Concept of Source Rock and Concentration Mechanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 50, 247–272.
- Li, P., Qian, H., Wu, J., Chen, J., Zhang, Y., & Zhang, H. (2013). Occurrence and hydrogeochemistry of fluoride in alluvial aquifer of Weihe River, China. *Environmental Earth Sciences*, 71(7), 3133–3145. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2691-6>
- Liesch, T., Hinrichsen, S., & Goldscheider, N. (2015). Uranium in groundwater - Fertilizers versus geogenic sources. *Science of the Total Environment*, 536, 981–995. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.133>
- Mahlknecht, J., Horst, A., Hernández-Limón, G., & Aravena, R. (2008). Groundwater geochemistry of the Chihuahua City region in the Rio Conchos Basin (northern Mexico) and implications for water resources management. *Hydrological Processes*, 22, 4736–4751. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Mansilla-Cuesta, M., Castroviejo-Fernández, P., & Delgado-Tajadura, J. (2020). *Espectrometría de Masas de Plasma (ICP-MS)*. <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/espectrometria/espectrometria-de-masas-de-plasma-icp-ms>
- Marshall, C., & Fairbridge, R. (1999). *Encyclopedia of Geochemistry*. Kluwer Academic Publishers. papers3://publication/uuid/5FA031AF-D370-428A-98AA-2FEB838FCAF0
- McDonough, W. F. (2003). Compositional Model for the Earth's Core. *Treatise on Geochemistry*, 2–9, 547–568. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/02015-6>
- Mcdowell, F. W., & Keizer, R. P. (1977). Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango City and Mazatlan, Mexico. *Bulletin of the Geological Society of America*, 88(10), 1479–1487. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1977\)88<1479:TOMVIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1977)88<1479:TOMVIT>2.0.CO;2)
- Méndez-Martínez, C., & Rondón-Sepúlveda, M. A. (2012). Metodología de Investigación: Introducción al Análisis factorial exploratorio. *Revista Colombiana de Psiquiatría*, 41(1), 197–207.
- Mercado-Reyes, J. R. (1977). *Estudio Geológico del Yacimiento de Uranio del Área “Las Margaritas” en la Provincia Uranífera de la Sierra Peña Blanca, Mpio. de Aldama, Edo. de Chihuahua* [Universidad Autónoma de San Luis Potosí]. <http://ninine.uaslp.mx/xmlui/bitstream/handle/i/2110/IGE1EGY97701.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Mifflin, M. D. (1968). *Delineation of groundwater flow systems in Nevada*. University of



Nevada.

- Monier-Castillo, A., & Lopez-Palomino, I. (2011). *Formación Cupido. Cretácico Temprano (Hauteriviano-Aptiano)* (Issue July). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14638.72005>
- Monreal, R., & Longoria, J. F. (1999). *A revision of the Upper Jurassic and Lower Cretaceous stratigraphic nomenclature for the Chihuahua trough, north-central Mexico: Implications for lithocorrelations*. https://www.researchgate.net/publication/284224925_A_revision_of_the_Upper_Jurassic_and_Lower_Cretaceous_stratigraphic_nomenclature_for_the_Chihuahua_Trough_north-central_Mexico_Implications_for_lithocorrelations#fullTextFileContent
- Mora, A., Mahlknecht, J., & Torres-Martínez, A. (2018). Evolution and multivariable analysis of trace elements in groundwater of an agricultural area in a semi-arid region of Mexico. *Energy Procedia*, 153, 196–201. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.007>
- Musgrove, M. L. (2021). The occurrence and distribution of strontium in U.S. groundwater. *Applied Geochemistry*, 126(December 2020), 104867. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104867>
- Navarro, O., González, J., Júnez-Ferreira, H. E., Bautista, C. F., & Cardona, A. (2017). Correlation of Arsenic and Fluoride in the Groundwater for Human Consumption in a Semiarid Region of Mexico. *Procedia Engineering*, 186, 333–340. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.259>
- Nordstrom, D. K., & Smedley, P. L. (2022). *Fluoride in groundwater*. The Groundwater Project.
- Núñez-Peña, E. P., Escalona-Alcázar, F. de J., Bluhm-Gutiérrez, J., Ramos-De la Cruz, G. A., De la Torre-Guerrero, A., Ortega-Martínez, E., & Cardona-Benavides, A. (2015). Caracterización hidrogeológica del acuífero Jerez, estado de Zacatecas, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, VI, 105–124. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v6n3/v6n3a8.pdf>
- Ocampo-Astudillo, A., Garrido-Hoyos, S., Salcedo-Sánchez, E., & Martínez-Morales, M. (2020). *Alteration of Groundwater Hydrochemistry Due to Its Intensive Extraction in Urban Areas from Mexico*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24962-5_22
- Ontiveros-Terrazas, A., Villalobos-Aragón, A., Espejel-García, V., & Espejel-García, D. (2020). Groundwater Quality and Its Impact on Health: A Preliminary Evaluation of Dental Fluorosis in Julimes, Chihuahua, Mexico. *Journal of Water Resource and Protection*, 12(07), 545–557. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2020.127033>
- Ortega-Guerrero, A. (2009). Presencia, distribución, hidrogeológica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(1), 143–161.
- Padilla-Palma, M. L., Herrera-Galván, D., Hernández-Velázquez, M., Pérez de la Cruz, J.



- A., García-Guzmán, J., & Torres y Espinosa, J. Á. (1997). Informe de la carta geológico-minera y geoquímica hoja Chihuahua H13-10. Escala 1:250,000. Estado de Chihuahua. In *Consejo de Recursos Minerales*. https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/T081997PAPM0001_01.PDF
- Palma Nava, A., González Villarreal, F. J., & Mendoza Mata, A. (2018). The development of a managed aquifer recharge project with recycled water for Chihuahua, Mexico. *Sustainable Water Resources Management*, 4(2), 371–382. <https://doi.org/10.1007/s40899-018-0234-8>
- Parrone, D., Ghergo, S., Frollini, E., Rossi, D., & Preziosi, E. (2020). Arsenic-fluoride co-contamination in groundwater: Background and anomalies in a volcanic-sedimentary aquifer in central Italy. *Journal of Geochemical Exploration*, 217, 106590. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106590>
- Parvaiz, A., Khattak, J. A., Hussain, I., Masood, N., Javed, T., & Farooqi, A. (2021). Salinity enrichment, sources and its contribution to elevated groundwater arsenic and fluoride levels in Rachna Doab, Punjab Pakistan: Stable isotope ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) approach as an evidence. *Environmental Pollution*, 268, 115710. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115710>
- Pi, K., Wang, Y., Xie, X., Su, C., Ma, T., Li, J., & Liu, Y. (2015). Hydrogeochemistry of co-occurring geogenic arsenic, fluoride and iodine in groundwater at Datong Basin, northern China. In *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 300). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.07.080>
- Radboud University. (2021). *ICP-MS*. <https://www.ru.nl/science/gi/facilities-activities/elemental-analysis/icp-ms/>
- Raffino, E. (2020). *Suelo*. <https://concepto.de/suelo/>
- Ramírez, J., & Acevedo, F. (1957). Notas sobre la geología de Chihuahua. *Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*. https://www.amgp.org/api/administration/publicaciones/5da3a0ba606dd_1957_22_Sep_Oct_GEOLOGIA_CHIHUAHUA_compressed.pdf
- Ren, M., Rodríguez-Pineda, J. A., & Goodell, P. (2022). Arsenic Mineral in Volcanic Tuff, a Source of Arsenic Anomaly in Groundwater: City of Chihuahua, Mexico. *Geosciences (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/geosciences12020069>
- Reyes-Cortés, M. (2004). *Las Grutas de Nombre de Dios* (H. Ramírez (ed.)). Dirección de Extensión y Difusión Cultural.
- Reyes-Cortés, M. (2005). *DISTRIBUCIÓN Y CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LAS FUENTES PRIMARIAS DEL VALLE DE CHIHUAHUA*.
- Reyes-Cortés, M., Montero-Cabrera, M. E., Rentería-Villalobos, M., Fuentes-Montero, L., Fuentes-Cobas, L., Herrera-Peraza, E. F., Esparza-Ponce, H., & Rodríguez-Pineda, A. (2007). Radioactive mineral samples from the northwest of Chihuahua City, Mexico.



Revista Mexicana de Física, 53(3), 23–28.

- Reyes-Gómez, V. M., Alarcón-Herrera, M. T., Gutiérrez, M., & López, D. N. (2013). Fluoride and arsenic in an alluvial aquifer system in Chihuahua, Mexico: Contaminant levels, potential sources, and co-occurrence. *Water, Air, and Soil Pollution*, 224(2). <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1433-4>
- Reyes-Gómez, V. M., Alarcón-Herrera, M. T., Gutiérrez, M., & López, D. N. (2015). Arsenic and Fluoride Variations in Groundwater of an Endorheic Basin Undergoing Land-Use Changes. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 68(2), 292–304. <https://doi.org/10.1007/s00244-014-0082-y>
- Sayer, S., & Goff, F. E. (1980). *A Geothermal Investigation of Spring and Well Waters of the Los Álamos Region, New Mexico*. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-6683-5_8
- Secretaría de Salud. (2000). *NOM-127-SSA1-1994*.
- SEMARNAT. (2016). *Parque Nacional Cumbres de Majalca*. https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/21_libro_pm.pdf
- SGM. (2002). Carta geológico-minera Chihuahua H13-C66 Chihuahua. In *Carta Geológico-Minera*. http://portal.sgm.gob.mx/cartas_impresas/productos/cartas/cartas50/geologia50/717_H13-C66_GM.html
- SGM. (2004). *Caliza Aurora. Albiano Inferior-Superior*. 1–4. <https://transboundary.tamu.edu/media/1250/aurora.pdf>
- SGM. (2006a). *Carta geológico-minera Sacramento H13-C56*.
- SGM. (2006b). *Formación Edwards (Grupo Fredericksburg). Albiano*. 1–3. <https://transboundary.tamu.edu/media/1242/edwards.pdf>
- SGM. (2009a). *Caliza Buda. Cretácico Tardío (Cenomaniano)*. <https://transboundary.tamu.edu/media/1253/buda.pdf>
- SGM. (2009b). *Caliza Loma de Plata. Cretácico Temprano (Albiano medio-tardío)*. 1–4. <https://xdoc.mx/preview/loma-plata-caliza-5e5acb76ae61a>
- SGM. (2009c). *Carta geológico-minera. El Sauz H13-C46*.
- SGM. (2009d). *Formación Benevides. Cretácico Temprano (Albiano)*. <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Benevides.pdf>
- SGM. (2009e). *Formación Finlay. Cretácico Temprano (Albiano). 1982*, 1–4. <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Finlay.pdf>
- SGM. (2009f). *Formación La Virgen. Cretácico Temprano (Hauteriviano-Barremiano)*. 1–5.
- SGM. (2010). *Formación Tomochic. Paleógeno, Oligoceno*.



<http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Tomochic.pdf>

- SGM. (2013). *Tamaulipas Superior. Cretácico Temprano- Cretácico Tardío* (p. 5).
- SGM, & FIFOMI. (2006). *Inventario físico de los recursos minerales del área Nombre de Dios, Chihuahua*.
https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/InventariosMinerosWeb/T0806HEVM0002_01.PDF
- Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2023). Uranium in natural waters and the environment: Distribution, speciation and impact. *Applied Geochemistry*, 148(December 2022), 105534. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105534>
- Smedley, P. L., Nicolli, H. B., Macdonald, D. M. J., Barros, A. J., & Tullio, J. O. (2002). Hydrogeochemistry of arsenic and other inorganic constituents in groundwaters from La Pampa, Argentina. *Applied Geochemistry*, 17(3), 259–284. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00082-8)
- Smedley, Pauline L., & Kinniburgh, D. G. (2017). Molybdenum in natural waters: A review of occurrence, distributions and controls. *Applied Geochemistry*, 84, 387–432. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.05.008>
- Su, C., Wang, Y., Xie, X., & Li, J. (2013). Aqueous geochemistry of high-fluoride groundwater in Datong Basin, Northern China. *Journal of Geochemical Exploration*, 135, 79–92. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.09.003>
- Subba-Rao, N., Devadas, D. J., & Srinivasa-Rao, K. V. (2006). Interpretation of groundwater quality using principal component analysis from Anantapur district, Andhra Pradesh, India. *Environmental Geosciences*, 13(4), 239–259. <https://doi.org/10.1306/eg.02090504043>
- Talpur, S. A., Noonari, T. M., Rashid, A., Ahmed, A., Jat Baloch, M. Y., Talpur, H. A., & Soomro, M. H. (2020). Hydrogeochemical signatures and suitability assessment of groundwater with elevated fluoride in unconfined aquifers Badin district, Sindh, Pakistan. *SN Applied Sciences*, 2(6). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2821-1>
- Taşan, M., Demir, Y., & Taşan, S. (2022). Groundwater quality assessment using principal component analysis and hierarchical cluster analysis in Alaçam, Turkey. *Water Supply*, 22(3), 3431–3447. <https://doi.org/10.2166/WS.2021.390>
- Traoré, M., & Bokar, H. (2020). *Principal Component Analysis of Hydrochemical Data From Groundwater Resources in Bamako*. October 2021, 570–575.
- UNAM. (2019). *Colecta, conservación y almacenamiento de muestras de agua*. 1–5. https://tellus.geociencias.unam.mx/wp-content/uploads/2019/01/manual_geoq_ambiental.pdf
- Velázquez-Aguirre, L., & Ordaz-Ayala, A. (1992). Provincias hidrogeológicas de México. *Ingeniería Hidráulica En México*.



- Villalobos-Aragón, A. (2004). *Sedimentología e hidrogeología del abanico aluvial de la Laguna de Encinillas, Chih., México* (Issue March 2004) [Universidad Autónoma de Chihuahua]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4696.2163>
- Villalobos-Aragón, A., Espejel-García, V. V., Espejel-García, D., & Rivas-Lobera, L. (2019). Shallow Subsurface Stratigraphy Inferred from the Use of Vertical Electrical Soundings (VES) Survey in Central Chihuahua, Mexico. *Open Journal of Geology*, 09(01), 15–28. <https://doi.org/10.4236/ojg.2019.91002>
- Wikipedia. (2021). *Diagrama de Caja*. https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_caja
- Yadav, A., Nanda, A., Sahu, B. L., Sahu, Y. K., Patel, K. S., Pervez, S., Gulgundi, M. S., Cuchí-Oterino, J. A., Martín-Ramos, P., & Bhattacharya, P. (2020). Groundwater hydrochemistry of Rajnandgaon district, Chhattisgarh, Central India. *Groundwater for Sustainable Development*, 11(January). <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100352>



Apéndice

APÉNDICE I. TABLAS DE RESULTADOS QUÍMICOS DE LAS MUESTRAS DE AGUA.

Clave	Si (mg/L)	Al (ug/L)	As (ug/L)	Fe (ug/L)	Hg (ug/L)	Mn (ug/L)	Pb (ug/L)	Sr (ug/L)	P (ug/L)
C1	13.69	< 0.1	40.85	17.71	0.51	< 0.01	< 0.01	177.65	204.75
C2	13.41	< 0.1	10.40	15.35	0.27	< 0.01	< 0.01	347.05	15.04
C3	8.35	< 0.1	13.23	20.58	0.33	< 0.01	< 0.01	876.40	13.03
C4	13.39	< 0.1	9.35	20.21	0.22	< 0.01	< 0.01	493.75	9.46
C5	12.49	< 0.1	51.01	18.90	0.36	< 0.01	< 0.01	240.20	7.74
C6	14.85	< 0.1	24.62	32.96	0.35	< 0.01	< 0.01	751.40	7.31
C7	14.88	< 0.1	20.58	36.56	0.31	< 0.01	< 0.01	666.70	10.24
C8	10.23	< 0.1	26.81	44.46	0.37	< 0.01	< 0.01	386.90	6.93
C9	14.82	< 0.1	25.56	50.26	0.29	< 0.01	< 0.01	387.60	9.60
C10	16.46	< 0.1	16.33	38.67	0.20	< 0.01	< 0.01	1469.00	8.34
C11	17.28	0.87	30.38	89.24	0.44	0.48	< 0.01	592.10	8.65
C12	13.41	< 0.1	32.19	32.20	0.32	< 0.01	< 0.01	654.35	9.59
C13	12.17	< 0.1	24.53	30.99	0.39	< 0.01	< 0.01	672.70	8.61
C14	13.92	< 0.1	20.83	45.14	0.21	< 0.01	< 0.01	363.60	8.68
C15	7.27	< 0.1	31.50	44.00	0.27	< 0.01	< 0.01	1333.50	7.87
C16	10.79	< 0.1	34.19	36.39	0.17	< 0.01	< 0.01	1570.00	7.89
C17	12.72	< 0.1	30.72	38.82	0.30	< 0.01	< 0.01	440.65	11.26
C18	13.76	< 0.1	25.49	40.57	0.30	< 0.01	< 0.01	630.10	11.59
C19	18.50	< 0.1	18.07	31.79	0.15	< 0.01	< 0.01	415.35	11.98
C20	14.05	< 0.1	24.07	26.95	0.36	< 0.01	< 0.01	547.60	9.75
C21	13.67	< 0.1	12.47	87.53	0.18	< 0.01	< 0.01	876.55	13.21
C22	16.79	< 0.1	13.87	30.03	0.21	< 0.01	< 0.01	581.40	11.20
C23	9.83	< 0.1	20.59	31.16	0.17	< 0.01	< 0.01	877.85	9.26
C24	0.79	1.27	5.84	48.27	0.13	< 0.01	< 0.01	312.85	10.35
C25	3.24	< 0.1	5.66	24.05	0.26	< 0.01	< 0.01	284.45	7.51
C26	11.37	< 0.1	9.02	19.48	0.17	< 0.01	< 0.01	148.15	9.86
C27	17.28	< 0.1	8.77	16.62	0.13	< 0.01	< 0.01	532.85	11.81
C28	18.10	< 0.1	4.85	23.34	0.15	< 0.01	< 0.01	479.50	9.07
C29	13.21	< 0.1	33.28	64.43	0.19	< 0.01	< 0.01	4562.50	10.50
C30	10.31	< 0.1	46.54	36.07	0.21	< 0.01	< 0.01	1799.00	8.52
C31	9.49	< 0.1	11.81	43.20	0.14	< 0.01	< 0.01	772.10	7.54
C32	8.42	< 0.1	40.44	21.33	0.15	< 0.01	< 0.01	1457.00	8.61
C33	10.75	< 0.1	33.62	25.86	0.16	< 0.01	< 0.01	1617.50	8.12
C34	13.12	< 0.1	46.62	15.00	0.44	< 0.01	< 0.01	479.55	8.65
C35	15.09	< 0.1	71.87	36.10	0.68	< 0.01	< 0.01	509.65	4.80
C36	11.21	< 0.1	67.05	18.29	0.71	< 0.01	< 0.01	532.30	6.41
C37	14.88	< 0.1	51.59	19.74	0.60	< 0.01	< 0.01	399.20	8.09
C38	8.64	< 0.1	57.59	22.46	0.56	< 0.01	< 0.01	349.65	8.42
C39	8.10	< 0.1	4.46	20.93	0.12	< 0.01	< 0.01	213.75	10.71
C40	9.88	< 0.1	18.68	19.04	0.12	< 0.01	< 0.01	180.40	7.11
C41	13.35	< 0.1	41.56	25.24	0.25	< 0.01	< 0.01	426.10	8.42
C42	12.13	< 0.1	38.60	40.08	0.27	< 0.01	< 0.01	485.15	7.63
C43	14.72	< 0.1	42.96	23.63	0.34	< 0.01	< 0.01	517.55	8.58
C44	17.16	< 0.1	41.18	27.95	0.34	< 0.01	< 0.01	550.10	10.19
C45	6.38	< 0.1	39.25	30.19	0.26	< 0.01	< 0.01	1475.50	5.76
C46	16.28	< 0.1	40.67	11.54	0.28	< 0.01	< 0.01	301.95	8.34
C47	9.47	< 0.1	6.98	14.68	0.11	< 0.01	< 0.01	178.80	8.56
C48	13.03	< 0.1	33.99	13.49	0.23	< 0.01	< 0.01	326.20	5.81
C49	10.66	< 0.1	21.07	17.39	0.20	< 0.01	< 0.01	295.00	5.64
C50	15.65	< 0.1	26.21	13.68	0.16	< 0.01	< 0.01	495.75	5.90
C51	12.70	< 0.1	24.74	42.31	0.20	< 0.01	< 0.01	508.00	5.44
C52	14.39	< 0.1	4.33	16.23	0.12	< 0.01	< 0.01	1244.00	11.95
C53	9.91	< 0.1	1.24	13.41	0.12	< 0.01	< 0.01	285.60	12.43
C54	6.12	< 0.1	11.59	9.90	0.11	< 0.01	< 0.01	244.45	9.53
C55	11.10	< 0.1	3.68	5.60	0.16	< 0.01	< 0.01	261.65	9.41
C56	15.86	< 0.1	6.20	15.57	0.14	1.05	< 0.01	646.55	35.24
C57	9.73	< 0.1	7.67	22.49	0.16	1430.50	< 0.01	819.05	9.89
C58	6.59	< 0.1	7.30	11.01	0.11	< 0.01	< 0.01	587.30	6.36
C59	4.71	< 0.1	4.13	16.67	0.12	0.26	< 0.01	271.45	8.28
C60	9.61	< 0.1	4.02	56.84	0.17	13295.00	< 0.01	898.40	8.39
C61	< 0.5	< 0.1	4.45	20.42	0.14	6.82	< 0.01	397.95	10.21
C62	< 0.5	41.33	4.35	47.81	0.16	4.75	< 0.01	389.40	9.05
C63	< 0.5	< 0.1	0.05	11.10	0.12	8.44	< 0.01	18.80	8.02



Clave	B (ug/L)	Be (ug/L)	Ba (mg/L)	Br (ug/L)	Cd (ug/L)	Ag (ug/L)	Au (ug/L)	Cr (ug/L)	W (ug/L)
C1	175.40	< 0.01	< 0.01	92.94	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.50	3.28
C2	56.09	< 0.01	0.25	34.28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.78	0.15
C3	72.20	< 0.01	0.72	182.85	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.34	0.51
C4	65.77	< 0.01	0.28	70.00	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.50	< 0.01
C5	131.00	< 0.01	0.30	77.85	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.47	3.57
C6	343.30	0.19	0.13	118.70	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.43	2.81
C7	425.10	0.29	0.02	132.25	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.00	1.65
C8	199.75	< 0.01	0.08	404.00	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03	1.70
C9	231.50	< 0.01	< 0.01	231.95	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.49
C10	228.45	0.09	1.10	489.40	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.23	0.04
C11	406.45	0.16	0.39	344.70	< 0.01	< 0.01	< 0.01	8.89	4.20
C12	341.55	0.23	< 0.01	113.90	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.77	3.39
C13	298.35	0.06	0.17	115.15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.64	2.79
C14	229.80	< 0.01	0.59	144.00	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.73	0.92
C15	265.65	< 0.01	0.27	109.30	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.67
C16	273.05	< 0.01	0.35	104.50	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.03	0.70
C17	261.35	< 0.01	0.06	80.22	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.14	2.89
C18	276.80	0.05	< 0.01	103.20	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.47	2.57
C19	76.77	0.04	< 0.01	62.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.80
C20	128.75	0.05	0.03	67.33	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.79	1.97
C21	103.00	0.05	0.02	145.65	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.16	0.14
C22	95.17	< 0.01	< 0.01	122.20	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.85	0.28
C23	162.85	0.10	< 0.01	36.87	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.51	0.85
C24	27.62	< 0.01	0.47	25.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.94	< 0.01
C25	20.34	< 0.01	< 0.01	21.87	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.14	< 0.01
C26	66.38	< 0.01	0.27	124.75	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.17	< 0.01
C27	31.33	< 0.01	< 0.01	77.67	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.92	0.08
C28	35.14	0.12	0.10	82.05	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.32	< 0.01
C29	573.25	< 0.01	0.48	372.50	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.67	0.39
C30	401.75	0.02	0.09	197.65	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.57	1.11
C31	172.50	< 0.01	0.05	100.55	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.43	0.17
C32	195.65	< 0.01	< 0.01	48.37	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.83	0.96
C33	191.30	< 0.01	0.16	50.84	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.93
C34	210.15	< 0.01	0.42	38.89	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.94	7.07
C35	287.60	0.12	< 0.01	42.30	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.30	11.78
C36	259.30	0.15	0.70	38.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.51	11.62
C37	252.00	< 0.01	0.27	44.29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.81	9.20
C38	223.15	< 0.01	< 0.01	40.18	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.79	9.34
C39	28.41	< 0.01	< 0.01	38.61	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.47	< 0.01
C40	50.91	< 0.01	0.49	28.69	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.99	0.47
C41	286.25	0.21	< 0.01	42.79	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.23	3.34
C42	229.65	0.15	0.34	42.52	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.08	3.73
C43	285.00	0.28	< 0.01	42.88	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.03	4.28
C44	303.20	0.19	0.23	48.87	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.01	4.11
C45	87.53	< 0.01	0.43	38.18	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.61	1.92
C46	179.00	0.04	< 0.01	33.30	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.95	3.13
C47	88.68	< 0.01	0.25	21.72	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.07	0.10
C48	178.45	0.11	0.11	35.93	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.11	2.67
C49	121.35	< 0.01	< 0.01	39.39	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.60	1.12
C50	207.10	0.06	< 0.01	39.99	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.21	1.57
C51	219.00	< 0.01	0.40	101.78	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.41	1.67
C52	121.70	< 0.01	0.18	174.65	< 0.01	< 0.01	< 0.01	7.99	< 0.01
C53	9.83	< 0.01	0.03	123.75	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
C54	41.59	< 0.01	< 0.01	52.68	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.70	< 0.01
C55	18.27	< 0.01	0.45	46.75	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.79	< 0.01
C56	13.04	< 0.01	< 0.01	105.35	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.92	< 0.01
C57	23.39	< 0.01	0.57	123.25	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.32	< 0.01
C58	42.19	< 0.01	< 0.01	82.30	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.06
C59	0.55	< 0.01	0.16	98.93	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
C60	18.40	< 0.01	0.58	105.65	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.41	< 0.01
C61	87.08	< 0.01	< 0.01	216.35	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.21	< 0.01
C62	68.23	< 0.01	< 0.01	137.20	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.10	< 0.01
C63	< 0.01	< 0.01	0.52	9.57	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01



Clave	Co (ug/L)	Cs (ug/L)	Cu (ug/L)	Ga (ug/L)	Ge (ug/L)	Sc (ug/L)	Li (ug/L)	I (ug/L)	Mo (ug/L)
C1	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.32	2.46	84.34	41.43	6.45
C2	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.57	17.68	26.56	< 0.01
C3	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.64	27.33	31.26	< 0.01
C4	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.53	23.27	56.54	< 0.01
C5	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03	2.57	69.43	46.30	3.03
C6	< 0.01	8.25	< 0.01	< 0.01	1.02	3.73	166.45	44.90	5.95
C7	< 0.01	3.04	< 0.01	< 0.01	0.44	4.02	130.45	42.89	5.09
C8	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.38	92.76	38.02	4.57
C9	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.16	4.23	125.90	34.23	3.48
C10	< 0.01	0.51	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.65	72.20	132.35	0.95
C11	< 0.01	7.95	< 0.01	< 0.01	1.01	4.51	158.85	53.72	7.40
C12	< 0.01	9.05	< 0.01	< 0.01	1.42	4.10	168.30	38.71	7.78
C13	< 0.01	7.91	< 0.01	< 0.01	0.86	4.11	150.60	36.15	5.86
C14	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.37	4.19	123.20	33.65	1.68
C15	< 0.01	2.20	< 0.01	< 0.01	0.68	3.42	114.85	52.41	4.58
C16	< 0.01	3.18	< 0.01	< 0.01	0.60	4.00	98.71	61.66	4.03
C17	< 0.01	2.52	< 0.01	< 0.01	0.32	3.69	112.05	33.22	6.65
C18	< 0.01	5.65	< 0.01	< 0.01	0.81	4.37	141.65	34.24	5.46
C19	< 0.01	5.09	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.81	73.72	39.27	0.54
C20	< 0.01	6.13	< 0.01	< 0.01	0.08	4.87	90.60	34.09	1.45
C21	< 0.01	4.66	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.36	75.46	54.03	< 0.01
C22	< 0.01	3.30	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.40	71.73	42.56	< 0.01
C23	< 0.01	7.56	< 0.01	< 0.01	0.10	2.99	111.40	20.32	3.31
C24	< 0.01	0.04	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.88	11.04	10.36	2.94
C25	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.68	9.31	10.86	1.49
C26	< 0.01	0.07	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.56	28.52	40.45	< 0.01
C27	< 0.01	5.06	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.60	43.54	31.84	< 0.01
C28	< 0.01	1.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.04	32.68	26.93	< 0.01
C29	< 0.01	4.17	< 0.01	< 0.01	0.25	4.18	168.95	102.00	3.89
C30	< 0.01	3.78	< 0.01	< 0.01	0.05	3.47	144.40	67.86	8.09
C31	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.78	84.22	30.42	0.73
C32	< 0.01	3.37	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.76	62.88	47.46	6.87
C33	< 0.01	3.11	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.30	66.85	47.35	5.00
C34	< 0.01	6.07	< 0.01	< 0.01	0.71	3.62	118.10	17.50	6.90
C35	< 0.01	14.38	< 0.01	< 0.01	1.83	3.40	198.30	19.62	11.37
C36	< 0.01	13.83	< 0.01	< 0.01	1.80	3.32	193.90	19.45	10.70
C37	< 0.01	6.03	< 0.01	< 0.01	1.87	3.66	170.25	18.65	8.55
C38	< 0.01	4.86	< 0.01	< 0.01	1.08	3.13	152.50	18.71	8.67
C39	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.78	8.54	12.87	< 0.01
C40	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.41	18.97	38.54	< 0.01
C41	< 0.01	9.55	< 0.01	< 0.01	1.20	3.83	192.65	23.28	7.50
C42	< 0.01	7.67	< 0.01	< 0.01	0.83	3.62	145.10	23.82	4.93
C43	< 0.01	11.74	< 0.01	< 0.01	1.34	4.36	177.40	23.75	6.63
C44	< 0.01	12.32	< 0.01	< 0.01	1.53	4.19	187.60	23.30	6.98
C45	< 0.01	2.42	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.91	35.74	27.78	4.61
C46	< 0.01	5.41	< 0.01	< 0.01	0.66	3.76	139.70	20.24	5.78
C47	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.70	30.68	29.57	2.20
C48	< 0.01	5.65	< 0.01	< 0.01	0.29	3.61	132.80	21.33	5.97
C49	< 0.01	3.05	< 0.01	< 0.01	0.02	2.80	71.14	26.31	3.04
C50	< 0.01	8.43	< 0.01	< 0.01	0.33	3.43	141.05	24.01	4.57
C51	< 0.01	7.65	< 0.01	< 0.01	0.28	3.17	145.20	23.38	3.50
C52	< 0.01	0.56	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.28	29.32	43.30	< 0.01
C53	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.65	2.62	12.33	< 0.01
C54	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.46	10.71	26.63	0.83
C55	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.31	7.45	16.02	< 0.01
C56	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.65	14.08	30.46	< 0.01
C57	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.44	14.34	223.30	2.81
C58	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.27	10.42	30.75	< 0.01
C59	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.30	12.45	45.29	< 0.01
C60	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.96	< 0.01	2.88	14.42	195.25	1.93
C61	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.99	177.60	2.59
C62	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.12	132.45	1.44
C63	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	12.39	< 0.01



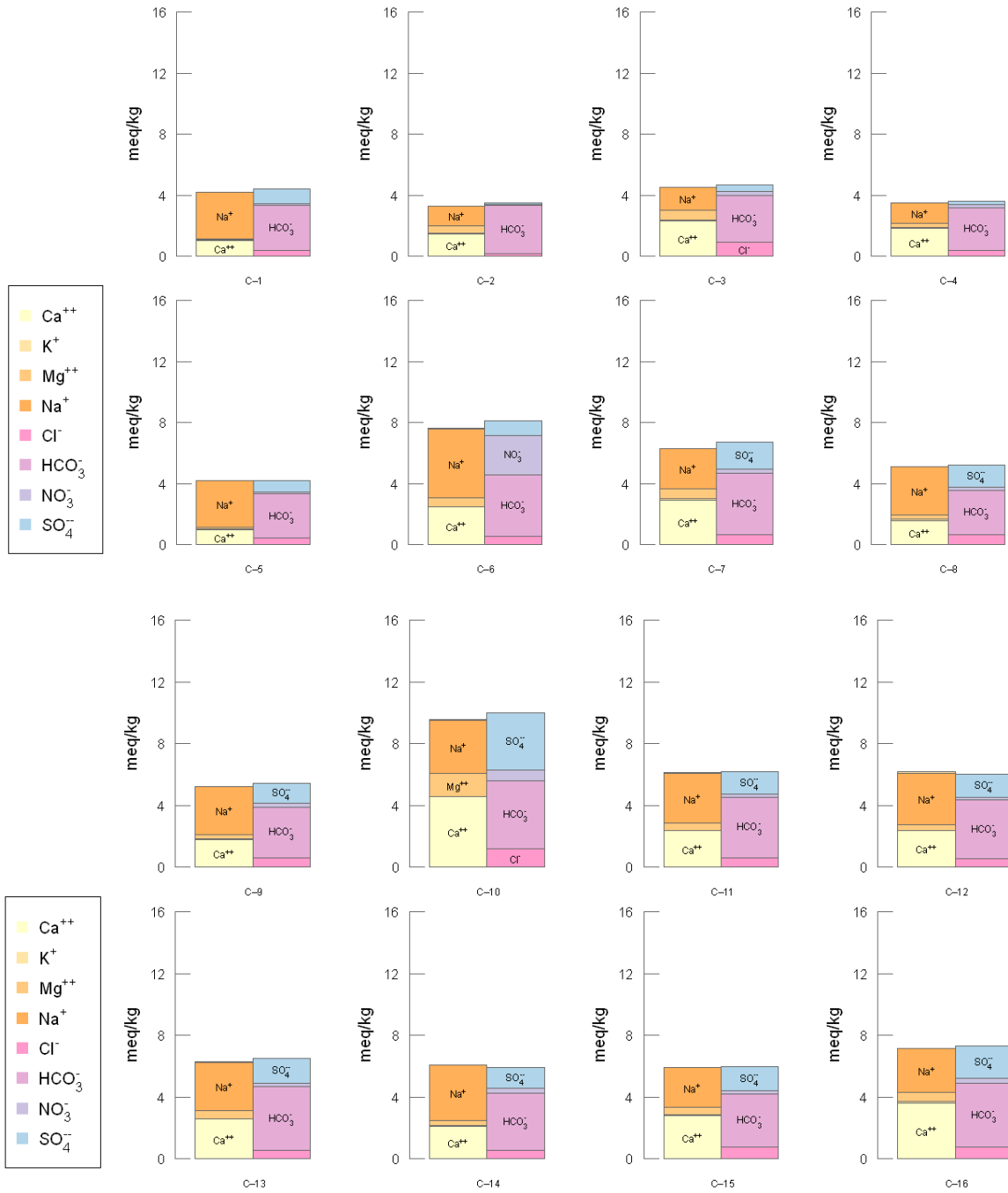
Clave	Rb (ug/L)	Ni (ug/L)	Re (ug/L)	Sb (ug/L)	Sn (ug/L)	Se (ug/L)	Ti (ug/L)	Tl (ug/L)	U (ug/L)
C1	7.89	1.81	0.01	< 0.01	< 0.01	57.48	8.10	< 0.01	6.48
C2	5.19	1.40	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.10	1.22	< 0.01	4.24
C3	4.85	0.14	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.89	0.99	< 0.01	5.73
C4	2.48	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.78	0.56	< 0.01	5.15
C5	5.59	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.14	< 0.1	< 0.01	4.06
C6	19.54	0.14	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.84	0.21	< 0.01	15.56
C7	11.45	0.94	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.19	0.25	< 0.01	11.25
C8	7.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	6.17	< 0.1	< 0.01	6.33
C9	10.26	1.26	< 0.01	< 0.01	< 0.01	17.62	0.28	< 0.01	8.32
C10	4.32	0.75	1.76	< 0.01	< 0.01	343.75	0.50	< 0.01	25.50
C11	18.68	0.26	< 0.01	< 0.01	< 0.01	6.02	1.32	< 0.01	12.06
C12	19.29	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.61	0.42	< 0.01	12.74
C13	17.84	0.84	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.14	0.17	< 0.01	11.87
C14	6.18	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.88	0.12	< 0.01	11.05
C15	17.02	0.59	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.08	0.34	< 0.01	11.31
C16	19.42	0.57	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.45	0.53	< 0.01	11.49
C17	14.40	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.81	< 0.1	< 0.01	6.20
C18	15.93	0.81	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.82	0.07	< 0.01	9.72
C19	12.40	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.66	0.90	< 0.01	4.98
C20	16.74	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.03	0.79	< 0.01	3.76
C21	17.49	0.70	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.22	0.76	< 0.01	6.94
C22	13.93	0.17	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.76	0.39	< 0.01	5.26
C23	21.55	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.30	< 0.1	< 0.01	16.88
C24	2.67	0.58	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.69	< 0.1	< 0.01	2.19
C25	2.23	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.33	< 0.1	< 0.01	1.53
C26	1.07	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.52	< 0.1	< 0.01	6.62
C27	7.02	1.06	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.13	0.66	< 0.01	5.40
C28	3.46	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.95	0.89	< 0.01	4.23
C29	27.31	2.24	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.96	0.09	< 0.01	36.64
C30	28.42	0.64	< 0.01	0.07	< 0.01	5.72	0.06	< 0.01	22.84
C31	2.70	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.93	< 0.1	< 0.01	11.70
C32	16.89	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.80	< 0.1	< 0.01	4.81
C33	16.89	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.62	< 0.1	< 0.01	6.23
C34	16.52	< 0.01	< 0.01	0.22	< 0.01	1.04	< 0.1	< 0.01	4.03
C35	26.39	< 0.01	< 0.01	1.35	< 0.01	1.64	< 0.1	< 0.01	6.20
C36	25.36	< 0.01	< 0.01	1.27	< 0.01	1.03	< 0.1	< 0.01	6.63
C37	22.44	< 0.01	< 0.01	0.32	< 0.01	1.43	< 0.1	< 0.01	5.27
C38	15.20	< 0.01	< 0.01	0.20	< 0.01	1.62	< 0.1	< 0.01	3.68
C39	2.99	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.36	< 0.1	< 0.01	< 0.01
C40	0.51	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.57	< 0.1	< 0.01	4.48
C41	16.14	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.77	0.16	< 0.01	5.89
C42	15.68	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.18	0.24	< 0.01	6.01
C43	21.35	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.22	0.25	< 0.01	5.39
C44	22.17	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.46	0.51	< 0.01	5.41
C45	12.63	< 0.01	< 0.01	0.27	< 0.01	0.95	< 0.1	< 0.01	2.37
C46	14.76	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.90	< 0.1	< 0.01	4.03
C47	4.85	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.21	< 0.1	< 0.01	6.45
C48	13.30	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.38	< 0.1	< 0.01	5.05
C49	10.89	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.88	< 0.1	< 0.01	6.55
C50	13.85	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.47	0.36	< 0.01	7.26
C51	17.92	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.64	< 0.1	< 0.01	6.81
C52	5.82	0.63	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.26	0.34	< 0.01	5.34
C53	8.24	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.87	< 0.1	< 0.01	1.00
C54	1.38	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.92	< 0.1	< 0.01	5.55
C55	6.34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.20	< 0.1	< 0.01	3.88
C56	3.76	0.25	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.49	0.64	< 0.01	12.32
C57	19.16	0.18	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.50	< 0.1	< 0.01	1.67
C58	6.81	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.53	< 0.1	< 0.01	5.03
C59	8.49	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.01
C60	19.14	0.15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.57	< 0.1	< 0.01	< 0.01
C61	5.94	0.08	< 0.01	0.22	< 0.01	2.25	< 0.1	< 0.01	5.53
C62	9.00	0.09	< 0.01	0.19	< 0.01	0.70	2.41	< 0.01	1.79
C63	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	12.07	0.41	< 0.1	< 0.01	< 0.01

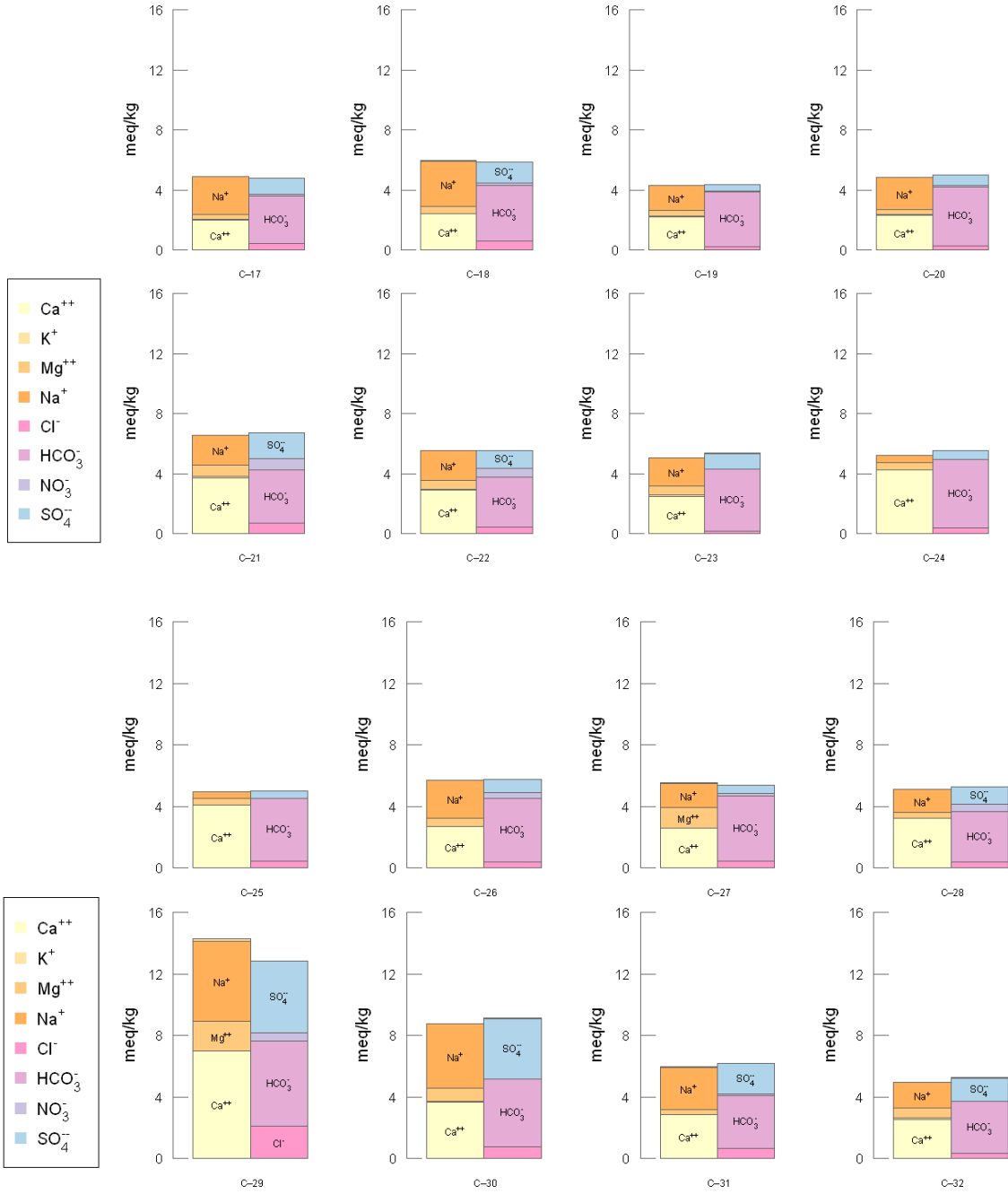


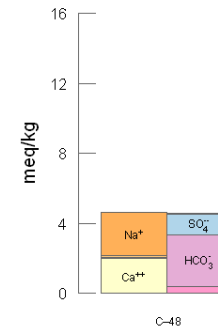
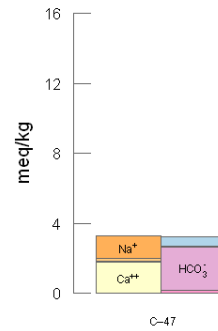
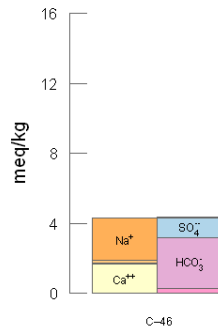
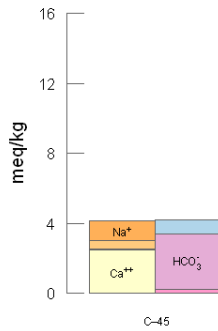
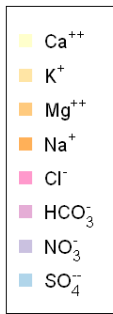
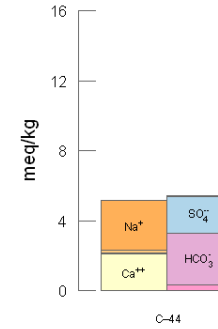
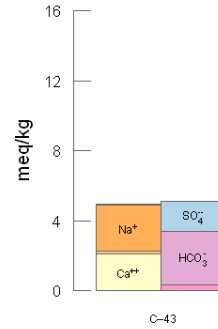
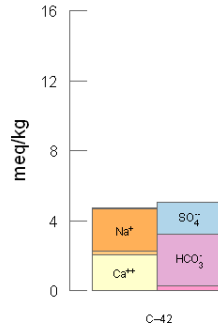
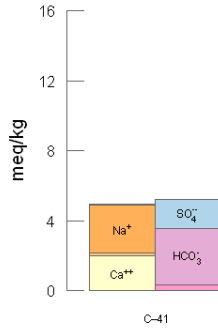
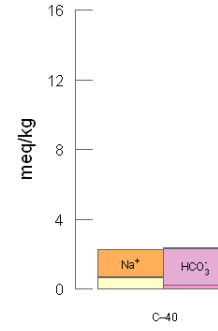
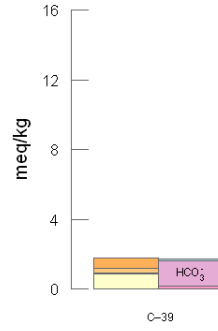
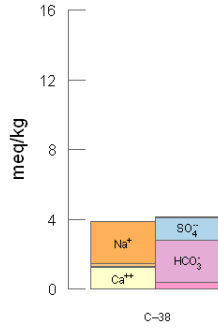
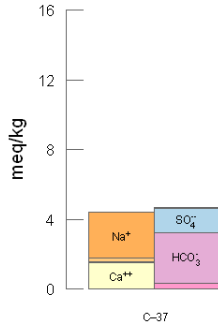
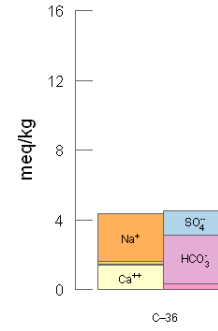
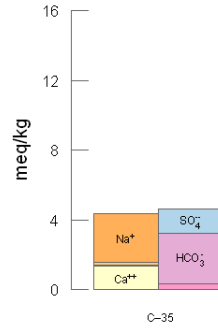
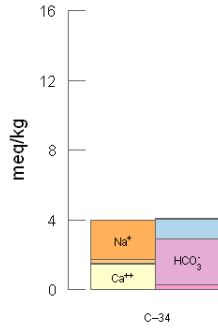
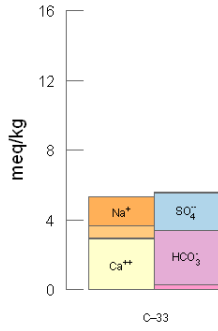
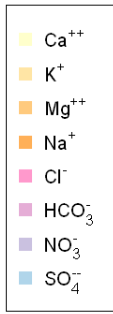
Clave	V (ug/L)	Zn (ug/L)	Zr (ug/L)	Y (ug/L)	Nb (ug/L)	Ru (ug/L)	Rh (ug/L)	Pd (ug/L)	Te (ug/L)
C1	12.85	27.03	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
C2	21.82	19.15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.06	< 0.01
C3	14.63	25.12	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.24	< 0.01
C4	11.74	44.39	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.08	< 0.01
C5	17.06	25.29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.05	< 0.01
C6	5.41	31.58	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.26	< 0.01
C7	8.39	23.18	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.18	< 0.01
C8	14.39	49.94	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.06	< 0.01
C9	11.21	58.33	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.08	< 0.01
C10	4.73	27.22	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.38	< 0.01
C11	6.67	66.34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.14	< 0.01
C12	5.86	24.71	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.18	< 0.01
C13	6.00	6.29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.14	< 0.01
C14	20.77	13.31	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.06	< 0.01
C15	8.25	19.56	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.39	< 0.01
C16	7.82	12.04	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.40	< 0.01
C17	8.83	30.49	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.12	< 0.01
C18	6.57	13.19	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.13	< 0.01
C19	18.25	22.58	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.10	< 0.01
C20	17.62	15.97	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.09	< 0.01
C21	14.40	50.56	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.19	< 0.01
C22	14.84	14.69	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.13	< 0.01
C23	4.76	31.81	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.24	< 0.01
C24	1.83	30.36	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.06	< 0.01
C25	1.68	42.33	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.06	< 0.01
C26	28.37	10.91	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
C27	21.36	17.47	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.13	< 0.01
C28	4.47	15.80	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.11	< 0.01
C29	8.34	53.51	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.34	< 0.01
C30	10.90	29.15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.46	< 0.01
C31	9.31	3.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.22	< 0.01
C32	8.05	13.70	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.47	< 0.01
C33	6.62	0.34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.46	< 0.01
C34	5.61	14.33	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.07	< 0.01
C35	2.98	16.11	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.10	< 0.01
C36	2.47	8.54	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.11	< 0.01
C37	3.81	5.10	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.07	< 0.01
C38	7.44	19.12	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.07	< 0.01
C39	6.48	12.45	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.05	< 0.01
C40	16.22	3.71	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.02	< 0.01
C41	4.83	13.34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.06	< 0.01
C42	5.15	19.64	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.11	< 0.01
C43	5.00	9.54	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.16	< 0.01
C44	4.53	9.52	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.11	< 0.01
C45	3.26	28.39	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.39	< 0.01
C46	6.81	12.78	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.07	< 0.01
C47	7.56	6.89	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
C48	5.03	6.20	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.06	< 0.01
C49	5.42	14.66	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.04	< 0.01
C50	4.08	4.09	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.16	< 0.01
C51	4.72	14.97	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.13	< 0.01
C52	11.79	40.24	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.30	< 0.01
C53	1.23	14.76	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.04	< 0.01
C54	9.80	11.34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.04	< 0.01
C55	5.22	16.51	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.04	< 0.01
C56	12.45	11.84	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.19	< 0.01
C57	< 0.01	0.37	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.20	< 0.01
C58	7.08	24.27	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.14	< 0.01
C59	< 0.01	38.46	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.04	< 0.01
C60	< 0.01	2.39	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.26	< 0.01
C61	1.70	24.44	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.06	< 0.01
C62	2.14	7.78	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.08	< 0.01
C63	< 0.01	39.25	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01

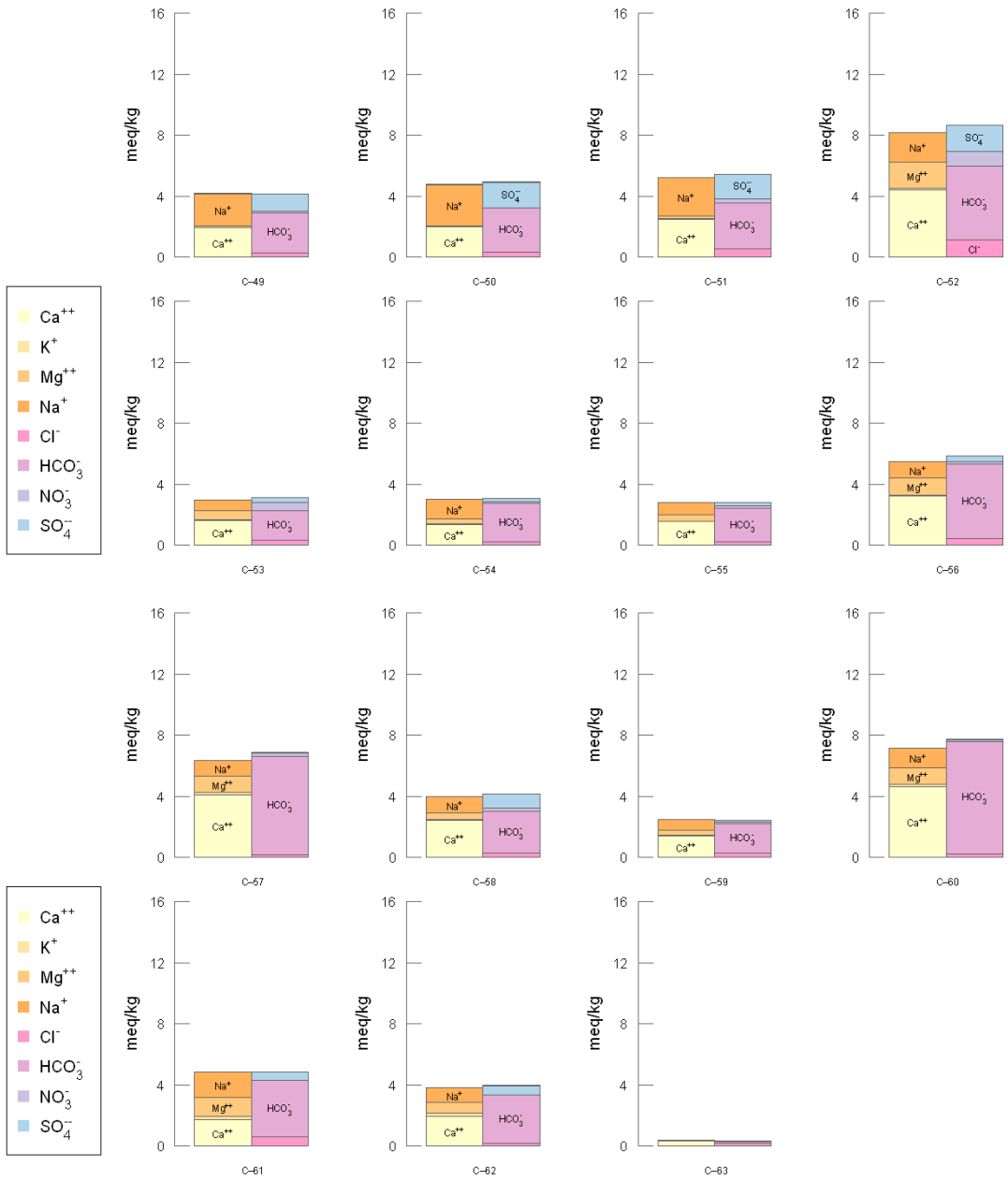


APÉNDICE II. DIAGRAMAS DE COLLINS DEL TOTAL DE MUESTRAS.



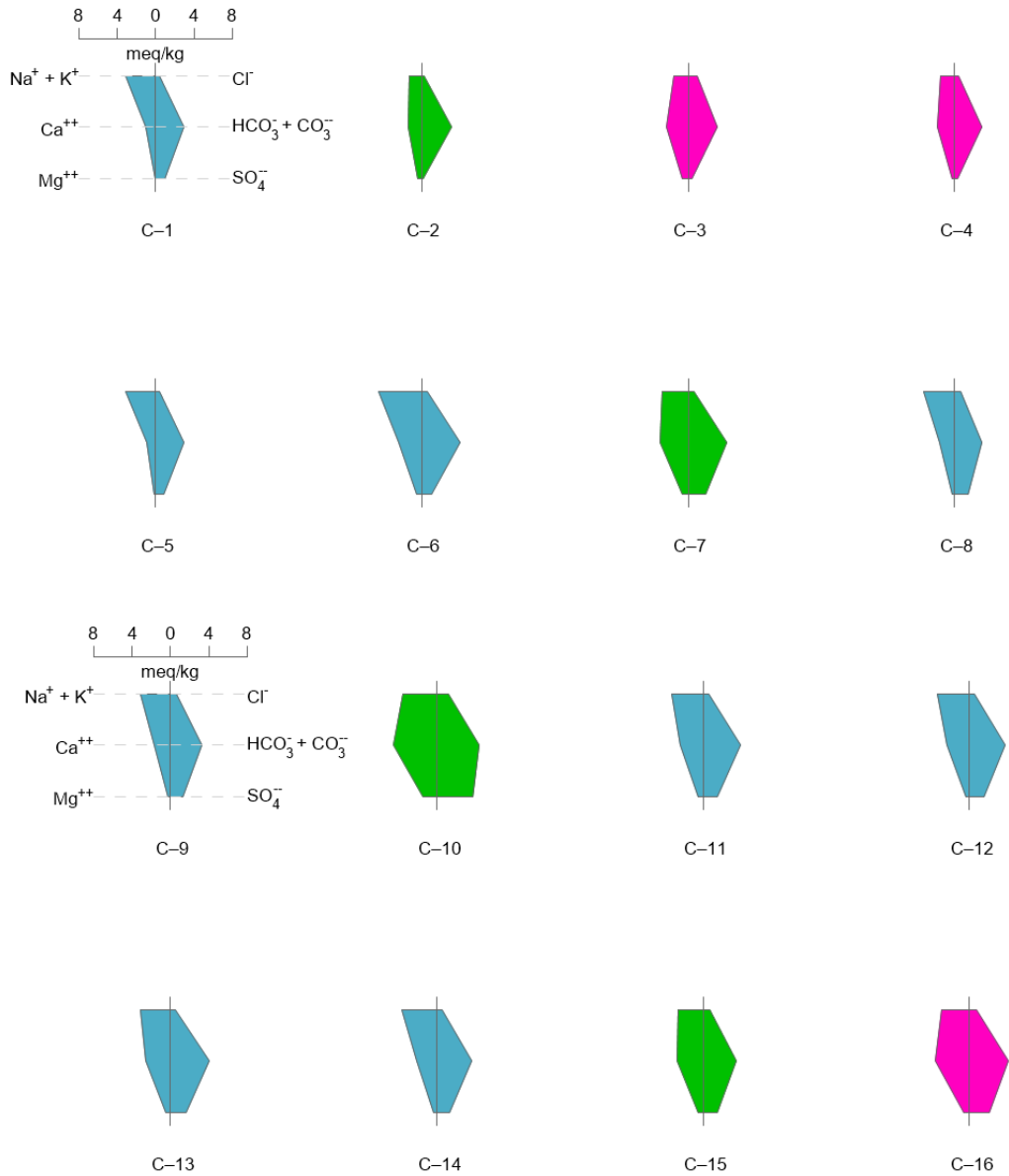


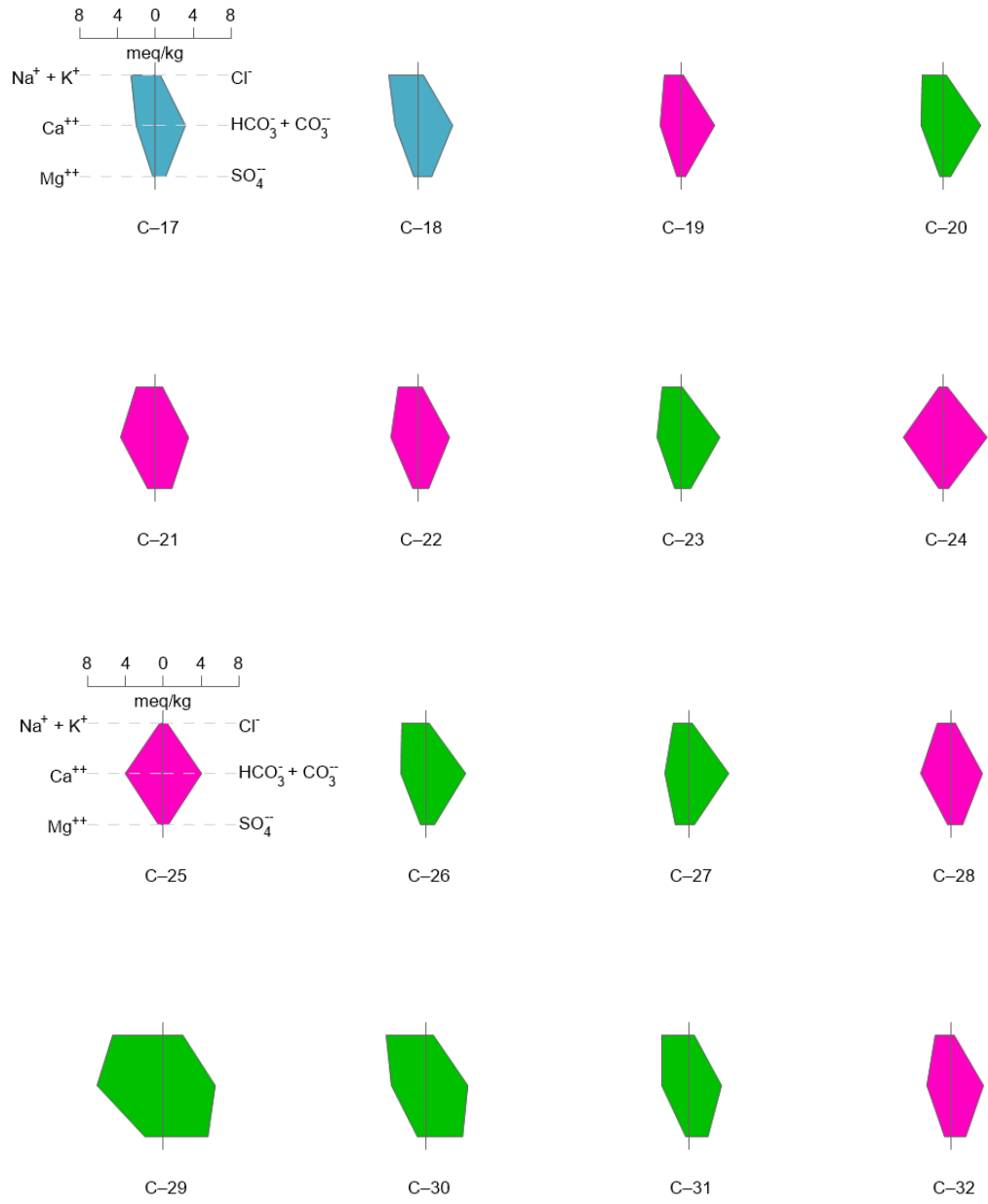


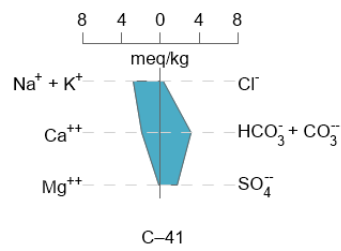
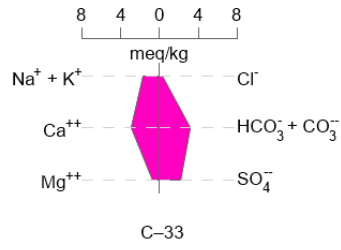




APÉNDICE III. DIAGRAMAS DE STIFF DEL TOTAL DE MUESTRAS.

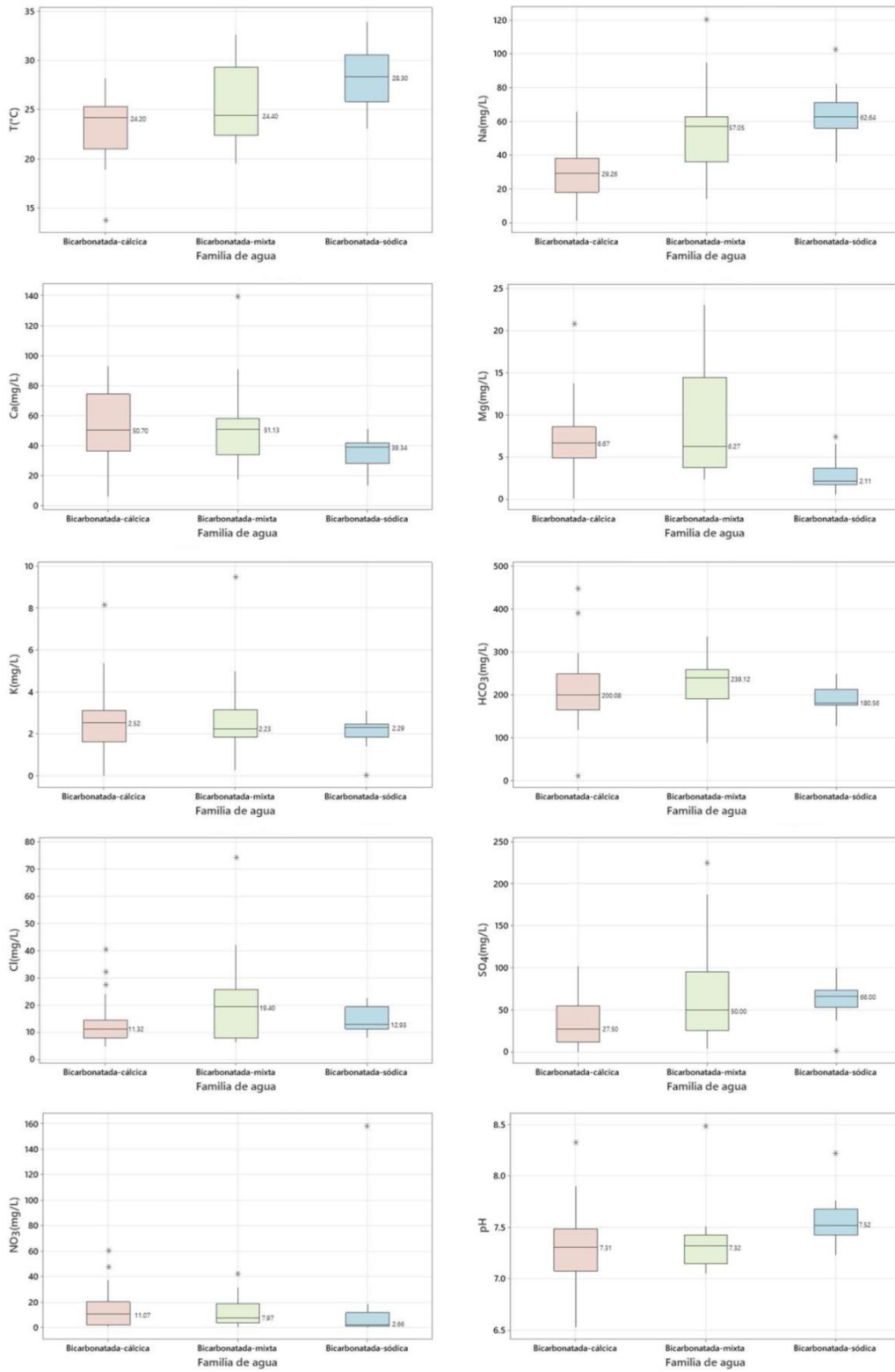


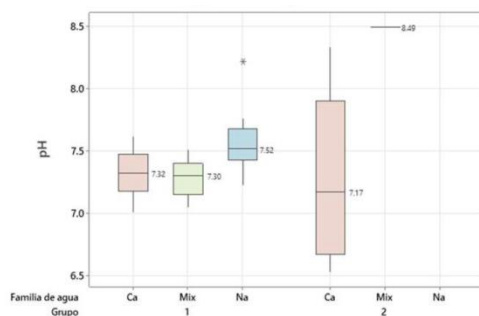
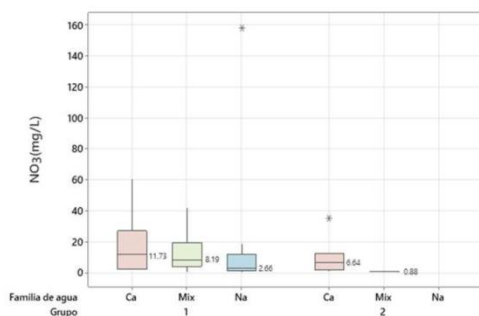
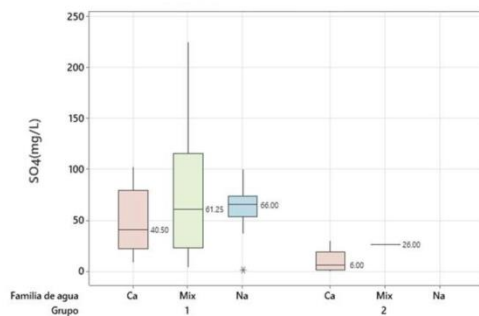
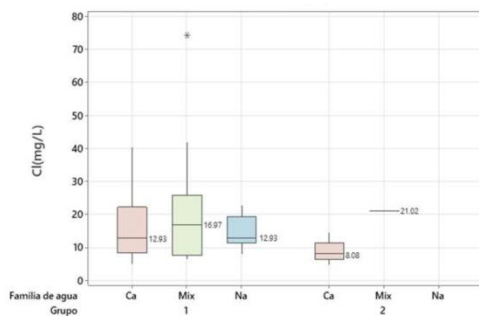
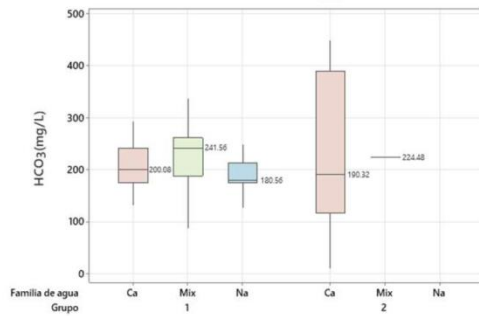
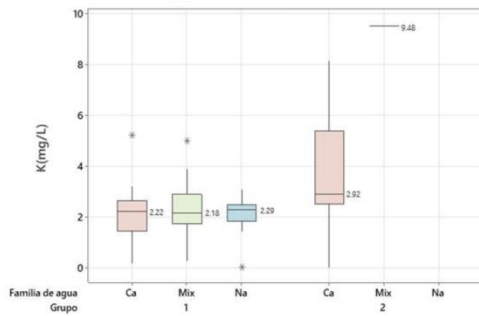
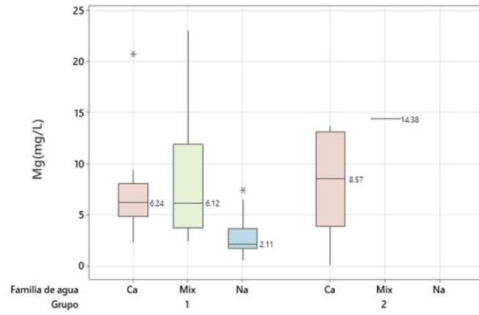
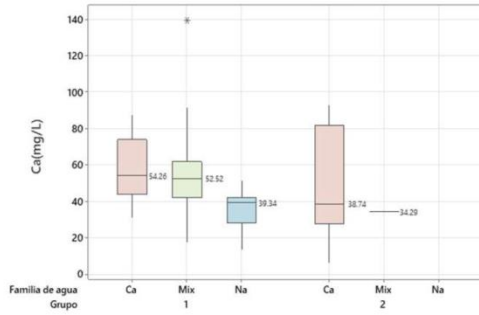
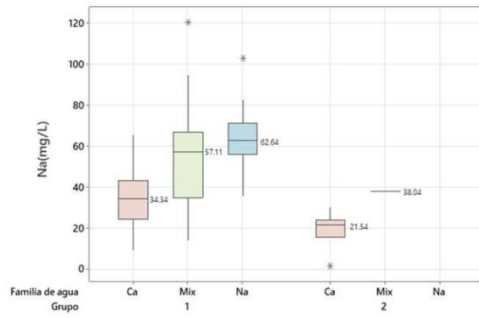
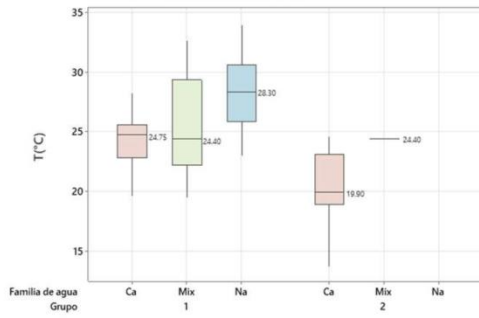






APÉNDICE IV. DIAGRAMAS DE CAJAS Y BIGOTES DE PARÁMETROS FISIQUÍMICOS. CLASIFICACIÓN POR FAMILIA Y GRUPO-FAMILIA.







Curriculum Vitae

Experiencia laboral

Investigadora. Proyecto de Tesis. Universidad Autónoma de San Luis Potosí (2021).

Trabajo de recolección de muestras de agua. Evaluación química en laboratorio y modelación hidrogeoquímica. Análisis de datos y generación de modelo conceptual.

Geólogo de campo. Prácticas profesionales. Servicio Geológico Mexicano (2019).

Exploración de prospectos para la localización de puntos de interés económico. Mapeo a detalle y semidetalle de vetas. Registro de datos geológicos y estructurales para la generación de reportes. Recolección de muestras litológicas para su descripción macroscópica.

Formación académica

Maestría en Ingeniería en Hidrología. Universidad Autónoma de Chihuahua (2020-2022)

Licenciatura en Ingeniería Geológica. Universidad Autónoma de Chihuahua (2015-2019)

Información extracurricular

XXXI Congreso Nacional de Geoquímica (2021).

Ponente en el área de Hidrogeoquímica e Hidrogeología. Congreso organizado por el Instituto Nacional de Geoquímica.

Tercer Coloquio de Investigación (2021).

Ponente en el área de hidrología. Coloquio de Investigación organizado por la Universidad Autónoma de Chihuahua.

Domicilio Permanente: Chihuahua, Chihuahua, 31200

Esta tesis/disertación fue mecanografiada por María Fernanda Espino Barrios.