

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA
FACULTAD DE INGENIERÍA
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y EXPERIMENTOS DE LIXIVIACIÓN EN
SUELOS DE DISTINTAS ZONAS AGRÍCOLAS EN
CHIHUAHUA, MÉXICO**

POR:

ING. INDRA DANIELA CERVANTES GONZÁLEZ

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA**

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

FEBRERO 2023



“Caracterización fisicoquímica y experimentos de lixiviación en suelos de distintas zonas agrícolas en Chihuahua, México”. Tesis presentada por Indra Daniela Cervantes González como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología, ha sido aprobado y aceptado 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. Alejandro Villalobos Aragón
Director de Tesis

Febrero 2023
Fecha

Comité
Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Dra. Vanessa Verónica Espejel García
Dra. Daphne Espejel García
Dr. Aldo Piñón Villareal



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

23 de febrero de 2022.

ING. INDRA DANIELA CERVANTES GONZALEZ

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. Alejandro Villalobos Aragón** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **“CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y EXPERIMENTOS DE LIXIVIACIÓN EN SUELOS DE DISTINTAS ZONAS AGRÍCOLAS EN CHIHUAHUA MÉXICO”**.

Índice de Contenido

Agradecimientos

Resumen

Capítulo 1. Generalidades

1.1. Introducción

1.2. Objetivos

1.3. Justificación

Capítulo 2. Marco físico

2.1 Cuauhtémoc

2.2 Buenaventura

2.3 Meoqui-Delicias

2.4 El Sauz-Encinillas

Capítulo 3. Marco conceptual

3.1 Ciclo hidrológico

3.2 Proceso en lixiviación

3.3 Suelo

Capítulo 4. Metodología

4.1 Investigación bibliográfica y revisión de trabajos previos

4.2 Trabajo de campo

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

4.3 Trabajo de laboratorio

4.4 Trabajo de gabinete

Capítulo 5. Discusión de resultados

5.1 Análisis sedimentológico

5.2 Caracterización granulométrica y clasificación del suelo

5.3 Resultados de permeabilidad

5.4 Digestión de sedimentos

5.5 Experimentos de columnas y análisis químico

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

Capítulo 7. Bibliografía

Capítulo 8. Anexos

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

ATENTAMENTE
"naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

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

**FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.**



DIRECCIÓN

**EL 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

*Con todo mi cariño y amor,
para mi familia.*

Quienes son mi mayor motivación e inspiración.

Agradecimientos

Mi familia, gracias por confiar en mí, por estar a mi lado y apoyarme en cada una de las aventuras que dan forma a esta vida, no sería la persona que soy sin ustedes. Gracias por ser la mejor familia que alguien pueda tener.

Agradezco infinitamente a mi director de Tesis, el Dr. Alejandro Villalobos, por su sabiduría, por inculcarme el gusto por investigar y enseñarme a amar la ciencia, por motivarme a continuar y guiarme siempre por el mejor camino. Gracias por creer en mí, por apoyar y hacer brillar mis sueños.

Mis amigos, quienes fueron los mejores compañeros de campo, resistiendo en todo momento las inclemencias del tiempo para sacar esas muestras, gracias a todos por su tiempo, su cariño y por compartir conmigo el entusiasmo de este proyecto.

A mis asesores, maestros y coordinador, por su valiosa guía y asesoramiento en la realización de esta investigación, así como a los laboratorios de Geología, Metalurgia, Ingeniería Sanitaria, Materiales, Suelos y Asfaltos, todos ellos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua.

Finalmente, agradezco enormemente a CONACyT por la oportunidad y el apoyo otorgado para la realización de esta investigación.

Gracias.

Resumen

La caracterización fisicoquímica y los experimentos de lixiviación realizados en muestras de suelo de 5 zonas agrícolas del estado de Chihuahua, permitieron identificar la facilidad con la que ciertos iones y elementos fueron puestos en solución bajo condiciones de saturación en columnas de acrílico y PVC. Las concentraciones de Ca^{+2} , K^+ , Mg^{+2} , Na^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{-2} , F^- y Fe fueron determinadas en los lixiviados de 15 muestras de suelos agrícolas, seleccionando a partir de estos resultados 8 muestras para el análisis de Ag, Al, Au, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, P, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Te, Ti, Tl, U, V, W y Zn. A la par, se analizaron a través de digestión de ácidos las concentraciones de los elementos antes mencionados en las muestras de suelos recolectadas, obteniendo así información de los componentes de la parte sólida y la parte en solución. En los resultados químicos de lixiviados se obtuvieron concentraciones elevadas de As, alcanzando valores desde 0.002 mg/L hasta 0.154 mg/L, así como F^- con valores de 0.08 mg/L a 6.56 mg/L, adicionalmente, se detectó también presencia de nitratos (<0 mg/L a 4,638.21 mg/L), sulfatos (0.31 mg/L a 2288 mg/L), fierro (<0.10 mg/L a 9.171 mg/L), aluminio (<0.001 mg/L a 10.116 mg/L) y selenio (<0.001 mg/L a 0.061 mg/L). La presencia de estos componentes se atribuye principalmente a las condiciones geológicas del área, la granulometría del material, así como a las reacciones que ocurren de manera frecuente en las porciones finas de un suelo. Cabe destacar que estas altas concentraciones en aguas subterráneas están condicionadas tanto a los procesos de lixiviación, como a ciertos factores como las características físicas del material, las condiciones de permeabilidad del suelo, la geología del área, las tasas de precipitación y evaporación, uso de agentes químicos en forma de fertilizantes, plaguicidas, fungicidas, etc., cada uno de los factores debe estudiarse minuciosamente para ampliar el conocimiento del funcionamiento de la parte superficial de un acuífero.

Índice de Contenido

Agradecimientos.....	vi
Resumen.....	vii
Capítulo 1. Generalidades.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Justificación.....	4
Capítulo 2. Marco Físico	5
2.1 Cuauhtémoc.....	6
2.1.1 Localización y vías de acceso	6
2.1.2 Clima	7
2.1.3 Uso de Suelo y cubierta Vegetal.....	7
2.1.4 Edafología.....	8
2.1.5 Geología	11
2.1.6 Hidrogeología	14
2.1.7 Hidrogeoquímica.....	15
2.2 Buenaventura.....	17
2.2.1 Localización y vías de acceso	17
2.2.2 Clima	18
2.2.3 Uso de Suelo y cubierta Vegetal.....	20
2.2.4 Edafología.....	20
2.2.5 Geología	21
2.2.6 Hidrogeología	27
2.2.7 Hidrogeoquímica.....	27

2.3 Meoqui-Delicias.....	29
2.3.1 Localización y vías de acceso	29
2.3.2 Clima	30
2.3.3 Uso de Suelo y cubierta Vegetal.....	30
2.3.4 Edafología.....	33
2.3.5 Geología	33
2.3.6 Hidrogeología	38
2.3.7 Hidrogeoquímica.....	39
2.4 El Sauz-Encinillas.....	40
2.4.1 Localización y vías de acceso	40
2.4.2 Clima	41
2.4.3 Uso de Suelo y cubierta Vegetal.....	42
2.4.4 Edafología.....	44
2.4.5 Geología	46
2.4.6 Hidrogeología	49
2.4.7 Hidrogeoquímica.....	49
Capítulo 3. Marco Conceptual.....	51
3.1 Ciclo hidrológico.....	51
3.2 Proceso de lixiviación.....	52
3.3 Suelo	53
3.3.1 Composición química de los suelos.....	53
Capítulo 4. Metodología	56
4.1 Investigación bibliográfica y revisión de trabajos previos.....	56
4.2 Trabajo de campo	56
4.3 Trabajo de laboratorio	60
4.3.1 Análisis físico de las muestras.....	60
4.3.2 Preparación de las muestras	64

4.3.3 Caracterización granulométrica	66
4.3.4 Clasificación del suelo	70
4.3.5 Pruebas de permeabilidad	73
4.3.6 Análisis de sedimentos	78
4.3.7 Diseño y construcción de columnas	78
4.3.8 Experimentos de columnas y análisis químico de lixiviados	81
4.4 Trabajo de gabinete	84
Capítulo 5. Discusión de resultados	85
5.1 Análisis sedimentológico	85
5.2 Caracterización granulométrica y clasificación del suelo	87
5.3 Resultados de permeabilidad	88
5.4 Digestión de sedimentos	90
5.5 Experimentos de columnas y análisis químico	94
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones	107
Capítulo 7. Bibliografía	110
Capítulo 8. Anexos	121
A. Clima.....	121
B. Uso de Suelo y cubierta Vegetal.....	124
C. Edafología	131
D. Caracterización sedimentológica	135
E. Granulometría	143
F. Permeabilidad	152
G. Análisis químico de lixiviados	154

Índice de Figuras

Figura 1. Acuíferos de los cuales se tomaron muestras tipo dentro de esta tesis. .	5
Figura 2. Localización geográfica del acuífero Cuauhtémoc.	6
Figura 3. Climas predominantes en el acuífero Cuauhtémoc.	8
Figura 4. Uso de Suelo y Cubierta Vegetal del acuífero Cuauhtémoc.	9
Figura 5. Edafología del acuífero Cuauhtémoc.	10
Figura 6. Textura del suelo en el acuífero Cuauhtémoc.	12
Figura 7. Geología del acuífero Cuauhtémoc.	13
Figura 8. Concentración de a) arsénico, b) fluoruros y c) nitratos).	16
Figura 9. Localización geográfica del acuífero Buenaventura.	17
Figura 10. Clima predominante del acuífero Buenaventura.	19
Figura 11. Uso de suelo y cubierta vegetal predominante en el acuífero Buenaventura.	22
Figura 12. Edafología del acuífero Buenaventura.	23
Figura 13. Textura dominante del suelo en el acuífero Buenaventura	24
Figura 14. Geología del acuífero Buenaventura.	26
Figura 15. Localización geográfica del acuífero Meoqui Delicias.	29
Figura 16. Clima predominante del Acuífero Meoqui – Delicias.	31
Figura 17. Uso de suelo y cubierta vegetal del acuífero Meoqui Delicias.	32
Figura 18. Edafología del acuífero Meoqui – Delicias.	34
Figura 19. Clase textural del suelo del acuífero Meoqui – Delicias.	35
Figura 20. Geología del acuífero Meoqui – Delicias.	37
Figura 21. Localización geográfica del acuífero El Sauz Encinillas.	40
Figura 22. Climas predominantes en el acuífero El Sauz Encinillas.	41
Figura 23. Uso de suelo y cubierta vegetal del acuífero El Sauz Encinillas	43
Figura 24. Edafología en el acuífero El Sauz Encinillas.	44
Figura 25. Tipo de textura en suelo del acuífero El Sauz Encinillas.	45
Figura 26. Geología en el acuífero El Sauz Encinillas.	48
Figura 27. Esquema del ciclo hidrológico	51
Figura 28. Profundidad de muestreo.	57

Figura 29. Recolección del material.	57
Figura 30. Rotulado de bolsas.....	58
Figura 31. Localización de las muestras tomadas en esta tesis.....	60
Figura 32. Grado de selección de los sedimentos	62
Figura 33. Grado de redondeamiento y esfericidad.....	62
Figura 34. Obtención de densidad de sólidos.....	65
Figura 35. Terrones de material cubiertos de parafina	66
Figura 36. Cuarteo del material.	67
Figura 37. Secado del material.....	67
Figura 38. Pesado y tamizado del material	68
Figura 39. Lavado del suelo	69
Figura 40. Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS) ASTM D 2487. 72	
Figura 41. Moldes de compactación.....	74
Figura 42. Preparación del cilindro de material	75
Figura 43. Muestra depositada en el permeámetro	75
Figura 44. Permeámetro sellado	76
Figura 45. Equipo para prueba de permeabilidad.....	76
Figura 46. Probetas con agua recolectada.....	77
Figura 47. Diseño experimental - prototipo inicial.....	79
Figura 48. Diseño del soporte para las columnas de suelo.	80
Figura 49. Equipo Temple Cell.	80
Figura 50. Llenado de columnas	81
Figura 51. Preparación de líneas, válvulas y contenedores	82
Figura 52. Esquema de columna de suelo con paso de agua a través de ella.....	83
Figura 53. Muestras de lixiviado enviadas a laboratorio externo	84
Figura 54. Muestra M00 en lupa.....	85
Figura 55. Muestra M01 en lupa.....	135
Figura 56. Muestra M02 en lupa.....	135
Figura 57. Muestra M03 en lupa.....	136
Figura 58. Muestra M04 en lupa.....	136
Figura 59. Muestra M04B en lupa	137

Figura 60. Muestra M05 en lupa.....	137
Figura 61. Muestra M06 en lupa.....	138
Figura 62. Muestra M07 en lupa.....	138
Figura 63. Muestra M08 en lupa.....	139
Figura 64. Muestra M09 en lupa.....	139
Figura 65. Muestra M10 en lupa.....	140
Figura 66. Muestra M11 en lupa.....	140
Figura 67. Muestra M12 en lupa.....	141
Figura 68. Muestra M13 en lupa.....	142

Índice de Gráficas

Gráfica 1E. Curva granulométrica M00	144
Gráfica 2E. Curva granulométrica M01	145
Gráfica 3E. Curva granulométrica M02	145
Gráfica 4E. Curva granulométrica M03	146
Gráfica 5E. Curva granulométrica M04	146
Gráfica 6E. Curva granulométrica M04B	147
Gráfica 7E. Curva granulométrica M05	147
Gráfica 8E. Curva granulométrica M06	148
Gráfica 9E. Curva granulométrica M07	148
Gráfica 10E. Curva granulométrica M08	149
Gráfica 11E. Curva granulométrica M09	149
Gráfica 12E. Curva granulométrica M10	150
Gráfica 13E. Curva granulométrica M11	150
Gráfica 14E. Curva granulométrica M12	151
Gráfica 15E. Curva granulométrica M13	151

Índice de Tablas

Tabla 1. Coordenadas de localización de las muestras de suelo.	59
Tabla 2. Escala de tamaño de grano de Udden-Wentworth	61
Tabla 3. Clasificación de madurez composicional.	63
Tabla 4. Clasificación de madurez textural.	63
Tabla 5. Equivalencias y simbología utilizada por el SGM.....	78
Tabla 6. Descripción sedimentológica para las muestras analizadas	86
Tabla 7. Porcentaje de finos que pasan la malla No. 200	87
Tabla 8. Clasificación de acuerdo con S.U.C.S.	88
Tabla 9. Resultados de pruebas de permeabilidad.....	89
Tabla 10. Resultados de Digestión con 4 ácidos y con ICP-OES.....	90
Tabla 11. Resultados de Digestión con 4 ácidos y con ICP-OES (continuación)..	91
Tabla 12. Concentraciones de referencia totales (CR _T) Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	92
Tabla 13. Resultados químicos de lixiviados (Parte 1)	96
Tabla 14. Resultados químicos de lixiviados (Parte 2)	97
Tabla 15. Relación entre resultados químicos en agua subterránea en pozos (históricos) y lixiviados obtenidos en este proyecto.....	98
Tabla 16. Cultivos comunes por zona de muestreo	100
Tabla A17. Clima predominante por acuífero	123
Tabla B18. Uso de Suelo y Cubierta Vegetal en el acuífero Cuauhtémoc.....	127
Tabla B19. Uso de suelo y cubierta vegetal acuífero Buenaventura.	128
Tabla B20. Uso de suelo y cubierta vegetal acuífero Meoqui Delicias.	129
Tabla B21. Uso de suelo y cubierta vegetal acuífero El Sauz Encinillas.	130
Tabla C22. Cobertura edafológica en el acuífero Cuauhtémoc.	133
Tabla C23. Cobertura edafológica en el acuífero Buenaventura.	133
Tabla C24. Edafología del acuífero Meoqui – Delicias.	134
Tabla C25. Edafología del acuífero El Sauz Encinillas	134
Tabla E26. Porcentaje que pasa cada malla Muestra M00 a M04.....	143
Tabla E27. Porcentaje que pasa cada malla Muestra M04B a M08	143

Tabla E28. Porcentaje que pasa cada malla Muestra M09 a M13.....	144
Tabla F29. Datos de preparación para pruebas de permeabilidad	152
Tabla F30. Cálculo de coeficiente de permeabilidad	153
Tabla G31. Resultados de análisis químico Laboratorio de Sanitaria.....	154
Tabla G32. Resultados de análisis químico SGM (Parte 1).....	155
Tabla G33. Resultados de análisis químico SGM (Parte 2).....	155
Tabla G34. Resultados de análisis químico SGM (Parte 3).....	156

Capítulo 1. Generalidades

1.1 Introducción

El proceso de lixiviación en suelos agrícolas hace referencia a la movilización de ciertos elementos solubles contenidos en el suelo, provocado por el riego de los cultivos o la lluvia. Los contaminantes naturales existentes en el suelo se dispersan por disolución al flujo del agua, los elementos químicos presentes pueden variar de acuerdo con las características del área, comúnmente se encuentran suelos con CaCO_3 , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} , Fe^{+2} (B@UNAM, sf).

Entre los estudios relacionados con la contaminación de cuerpos de agua proveniente de las altas concentraciones de ciertos iones en el suelo tanto de origen natural como antropogénico, se encuentra el llevado a cabo en el acuífero de Mnasra (Marruecos) por Tamoh *et al.* (2005), donde se realizó un análisis cualitativo y cuantitativo del transporte de nitratos (de fuente agroquímica) a través de la zona no saturada. Montoya (2008) realizó una investigación en España, enfocada a la modelación matemática del transporte y las transformaciones del nitrógeno proveniente del purín animal en la zona no saturada. De manera similar, Martínez *et al.* (2015), utilizando columnas de suelo describió el movimiento del oxadixyl (plaguicida) en cultivos de cebollas en Colombia. Granillo (2015), realizó una caracterización de sedimentos para la identificación de minerales contaminantes, especialmente arsénico y flúor con posible origen natural, utilizando columnas de suelo con material obtenido en la porción norte de Laguna de Encinillas, Chihuahua.

Como se describió anteriormente, se han realizado diversos estudios relacionados con la utilización de columnas de suelos para determinar y describir el comportamiento de ciertos contaminantes bajo condiciones controladas, sin embargo, en la etapa de investigación documental para esta tesis, se encontró información limitada referente a la aplicación de esta metodología para la evaluación y comparación de elementos puestos en movilización por procesos de lixiviación en zonas agrícolas en el Estado de Chihuahua. Lo anterior debe de ser considerado a la hora de elaborar modelos matemáticos de transporte en la zona no saturada, pues afecta de una forma muy importante el ciclo geoquímico y generalmente son soslayados en los modelos de flujo de solutos en ambientes saturados.

Mediante la caracterización fisicoquímica y posteriormente la realización de experimentos de lixiviación utilizando muestras de suelo, se evaluaron las concentraciones de ciertos elementos y compuestos de interés en suelos de zonas agrícolas en el estado de Chihuahua. Primeramente, se tomaron muestras de suelo en localidades de Cuauhtémoc, Delicias, Buenaventura y se utilizó, además, la información de Granillo (2015), de la zona del Sauz-Encinillas, para llevar a cabo la comparación entre los resultados químicos del material y los lixiviados. Se tomaron en cuenta factores como granulometría, condiciones ambientales y geológicas, así como las profundidades a la que se tomaron las muestras. Lo anterior permitió generar información sobre cuales elementos y iones son puestos en solución con el paso del agua, así como información base sobre los procesos de lixiviación (físicos y químicos) que posiblemente sirva como base para el desarrollo de futuras investigaciones sobre el comportamiento del suelo de regiones agrícolas del Estado de Chihuahua, y en general para estudios de modelación de transporte de solutos tanto en la zona no saturada como en los acuíferos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Realizar la caracterización fisicoquímica de suelos que componen la zona no saturada en diferentes zonas agrícolas del estado de Chihuahua. Posteriormente, realizar experimentos de lixiviación que permitan delimitar la facilidad con la cual los elementos son puestos en solución mediante la interacción con el agua en condiciones de saturación.

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluación de parámetros físicos como granulometría, madurez mineralógica y textural.
- Determinación mediante pruebas de digestión de suelos de las concentraciones de 33 elementos de interés en suelos de diferentes zonas agrícolas del estado.
- Diseño de un sistema de columnas de lixiviación, que permitan simular el drenaje y disolución de solutos de las muestras en condiciones de saturación.
- Determinar a través del uso de columnas de suelo las concentraciones en los lixiviados, que permitan evaluar cómo es que dichos elementos son puestos en solución, de acuerdo con las variaciones en las características del material.
- Analizar y comparar los resultados de las concentraciones de acuerdo con las características del ambiente y la geología, de tal forma que permita a futuro y en próximas investigaciones elaborar modelos conceptuales para explicar las variaciones en los comportamientos en cada tipo de suelo.

1.3 Justificación

La contaminación hídrica, acarrea consigo importantes consecuencias negativas en los cuerpos de agua, entre las cuales destacan la menor disponibilidad de agua de buena calidad para consumo, aumento en el costo de tratamientos para agua potable, alteración y degradación de la vida acuática y generación y transmisión de enfermedades en seres vivos debido a su consumo.

Tradicionalmente, los estudios de calidad de agua de los acuíferos del estado de Chihuahua se enfocan en determinar las concentraciones de los iones dominantes y compararlos con la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994), desde una perspectiva hidroquímica. Actualmente, existe un número limitado de informes que determinen las concentraciones y movilidad de elementos de interés en el medio no saturado. Comúnmente se menciona que se debe trabajar en la caracterización del material geológico (rocas y suelo) para poder determinar el posible origen de los contaminantes en el agua, o sus mecanismos de interacción con el medio geológico. Sin embargo, dichos estudios rara vez se han realizado, salvo en casos de contaminación por actividades antropogénicas.

En sitios donde la concentración de elementos esté por encima de los valores establecidos por la NOM-127 en aguas subterráneas, se considera que el origen puede tener dos posibles fuentes: antropogénica o, ser producto del intemperismo de las rocas circundantes (geogénico). Es por esto, por lo que se plantea realizar la caracterización fisicoquímica del material superficial, al menos en los primeros 50 cm del regolito, así como experimentos de columnas de suelo, que permitan determinar la posibilidad de que estos elementos y/o compuestos sean puestos en solución por el paso del agua a través de ellos, esto aplicado a ciertas poblaciones como lo son Buenaventura, Cuauhtémoc, Meoqui y Delicias, a las cuales se tiene acceso tanto a cultivos como a estudios relacionados con agua. Con los resultados obtenidos, es posible llevar a cabo un análisis más detallado que permita comparar las condiciones ambientales de las zonas y del medio.

Capítulo 2. Marco Físico

En esta sección se hará una breve descripción del entorno físico de las zonas estudiadas en esta Tesis. Comenzando con el acuífero Cuauhtémoc, seguido de Buenaventura, Meoqui Delicias y finalmente El Sauz-Encinillas. Cabe mencionar, que el acuífero Alta Babícora, se seleccionó ya que de la zona se recolectó arena que actuó como muestra base (o blanco), debido a su composición y a estar en una zona desértica relativamente joven y sin influencia de la agricultura (dunas del Porvenir del Campesino). En la Figura 1 se indican la localización de los acuíferos de donde se tomaron las muestras.

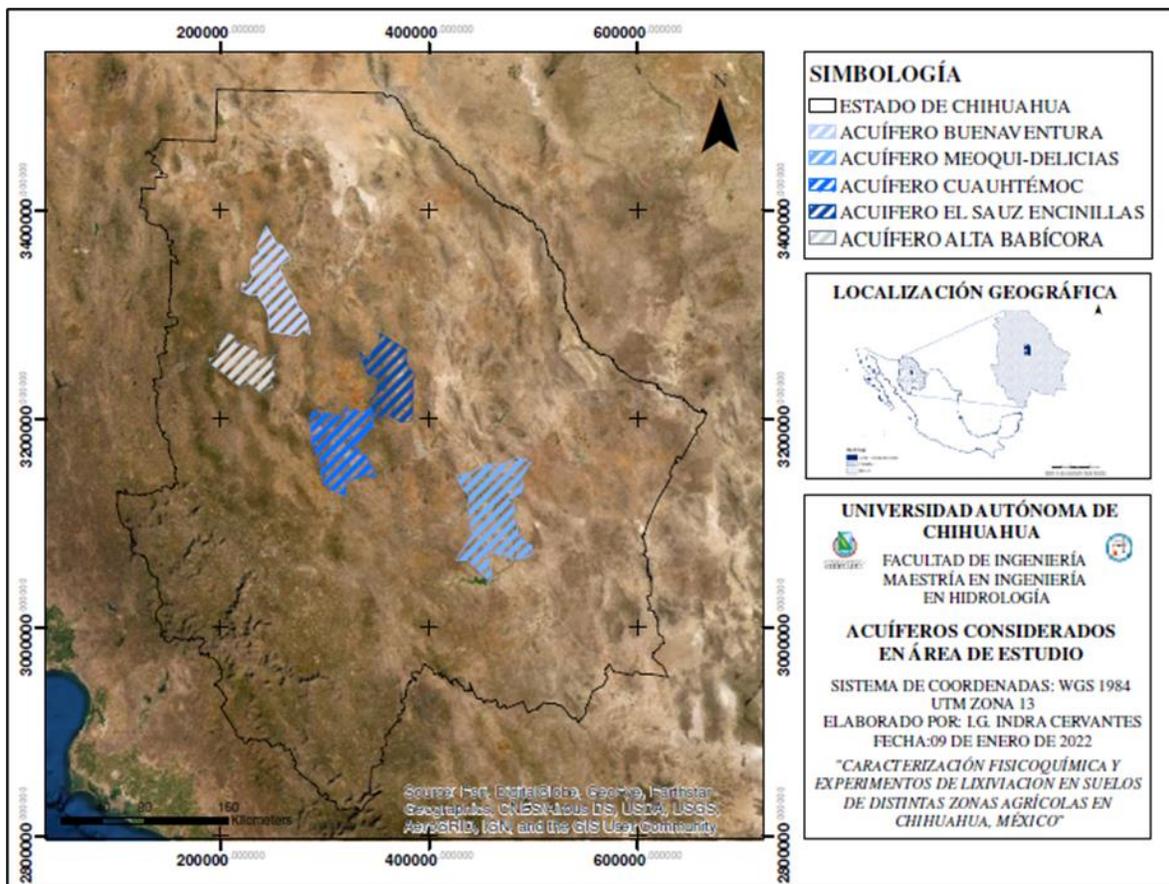


Figura 1. Acuíferos de los cuales se tomaron muestras tipo dentro de esta tesis.

2.1 Cuauhtémoc

2.1.1 Localización y vías de acceso

El área de estudio se encuentra ubicada aproximadamente en las coordenadas 314181.32 E y 3175123.37 N (WGS 1984, UTM Zona 13N), en la porción centro-oeste del estado de Chihuahua (Figura 2).

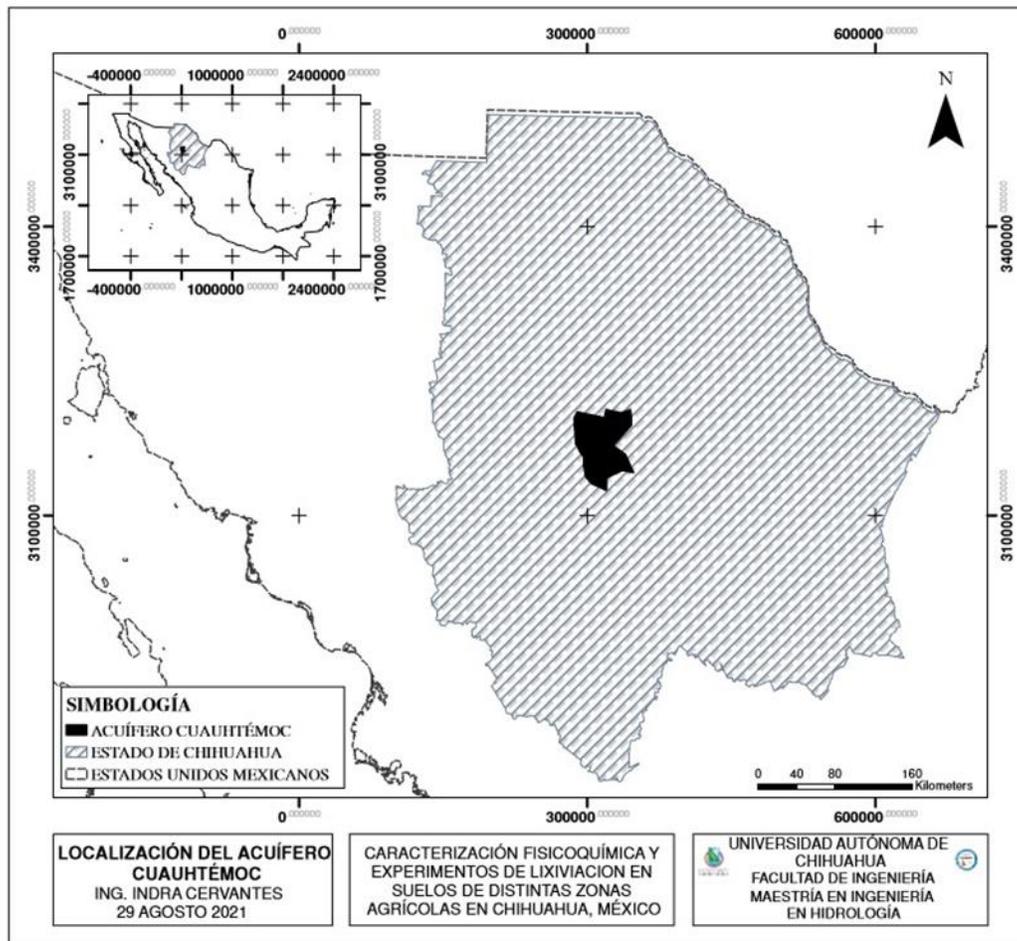


Figura 2. Localización geográfica del acuífero Cuauhtémoc.

Se localiza a 60 km al oeste de la capital del Estado, abarcando una superficie de 3,401 km² y un perímetro de 286.93 km. Administrativamente, el acuífero limita al norte con el acuífero Santa Clara, al noroeste con el acuífero El Sauz-Encinillas, al este y sur con Alto Río San Pedro, al suroeste con Laguna de Mexicanos y al oeste con los acuíferos Baja Babícora y Guerrero-Yepómera.

Las vías de acceso principales están determinadas por la autopista Cd. Chihuahua a Cd. Cuauhtémoc atravesando de este a oeste la zona de estudio, así

como la autopista Cd. Cuauhtémoc - La Junta que va de este a oeste. Se encuentra además el corredor comercial que atraviesa de sur a norte desviándose hacia el noroeste (hacia Bachíniva) y hacia el noreste hacia el campo 48. Además de estas, se tienen carreteras menos transitadas y diversos caminos de terracería, las vías del ferrocarril (Chihuahua-Pacífico) pasan por la zona sur del acuífero de este a oeste.

2.1.2 Clima

De acuerdo con el sistema de clasificación climática desarrollado por Köppen y modificado por la M. C. Enriqueta García para la República Mexicana (1990), para México, dentro de la zona del acuífero Cuauhtémoc existen tres diferentes tipos de climas BS1kw, BS1k"w, y Cb'(w1) x', que van desde el tipo seco hasta semifrío subhúmedo. Siendo el clima semiseco templado el clima dominante, localizado en la porción central del acuífero (Figura 3). La precipitación promedio de la región es de 300-500 mm anuales (INEGI, 2010). En la Tabla A17 del Anexo A se describen cada uno de los climas, así como su porcentaje de cobertura.

2.1.3 Uso de Suelo y cubierta Vegetal

De acuerdo con la clasificación de Uso de Suelo y Cubierta Vegetal propuesta por el INEGI (Serie V), el acuífero está cubierto principalmente por zonas agrícolas, las cuales cubren más de la mitad de la superficie (Figura 4), posteriormente se encuentran los Bosques de Encino-Pino con un porcentaje menor a un cuarto de la superficie localizado en las zonas altas que bordean el acuífero, en la Tabla B18 del Anexo B se muestran los porcentajes de cobertura.

Dentro de las actividades económicas desarrolladas en la región destacan la fruticultura, la agricultura y la ganadería principalmente, destacando la producción de manzana la cual es el principal pilar económico de Cd. Cuauhtémoc. Además de la manzana se tienen cultivos de maíz, trigo, cebada, avena, alfalfa y hortalizas. En los campos menonitas localizados a lo largo de la carretera Cuauhtémoc - Colonia Álvaro Obregón existe un desarrollo agrícola y comercial extenso.

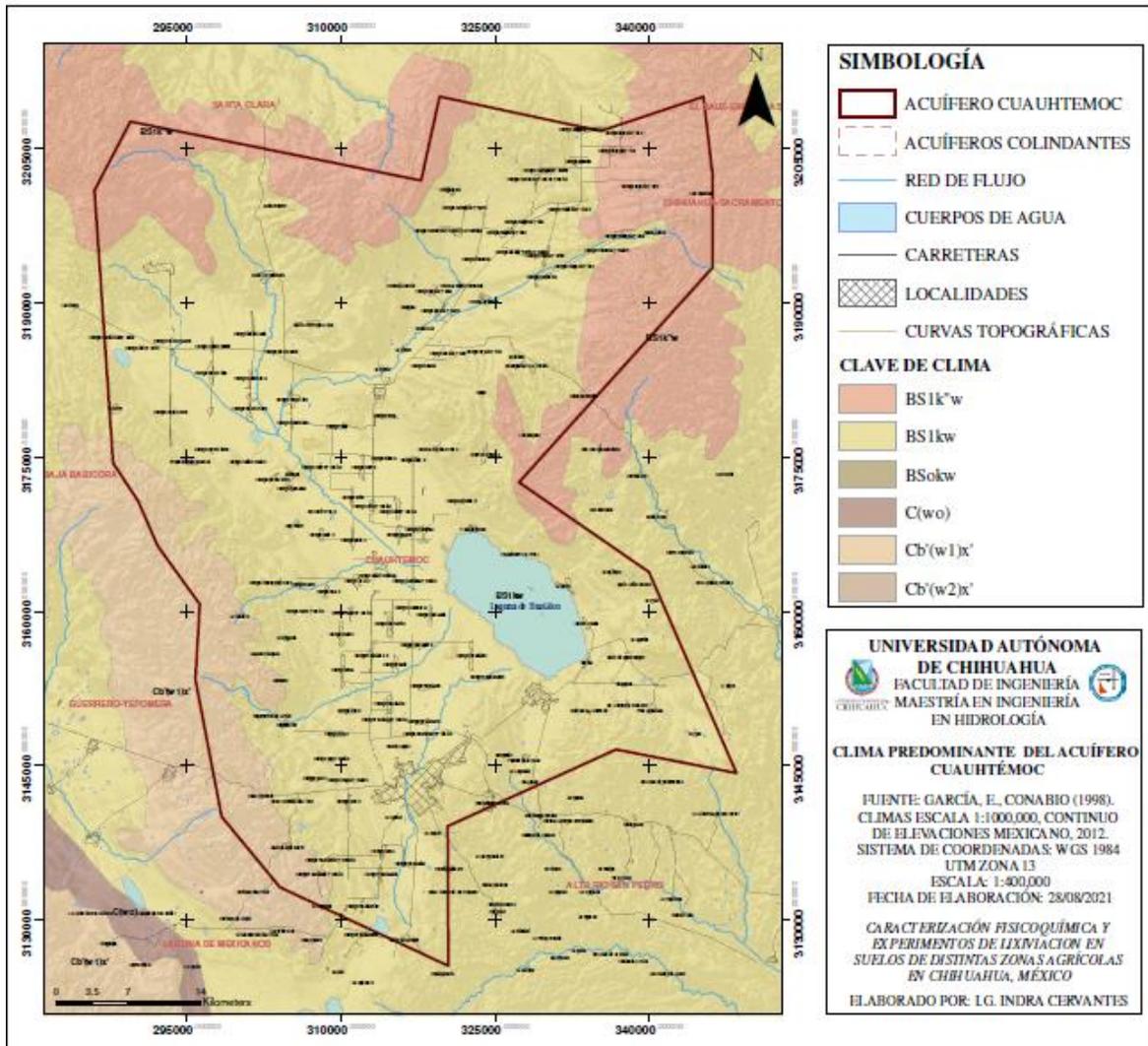


Figura 3. Climas predominantes en el acuífero Cuauhtémoc.

2.1.4 Edafología

De acuerdo con la carta Edafológica (INEGI, 2013), en el área abarcada por el acuífero se presentan 9 tipos de suelo (Figura 5), siendo el dominante el tipo Luviso (LV) el cual cubre más del 30% de la superficie, este tipo de suelo presenta una alto porcentaje de arcilla acumulada en el subsuelo, además, se tienen en segundo lugar de cobertura el Leptosol (LP) y posterior Phaeozem (PH), cubriendo más del 50% entre los tres, el resto de suelos y sus respectivas áreas de cobertura se indican en la Tabla C22 del Anexo C.

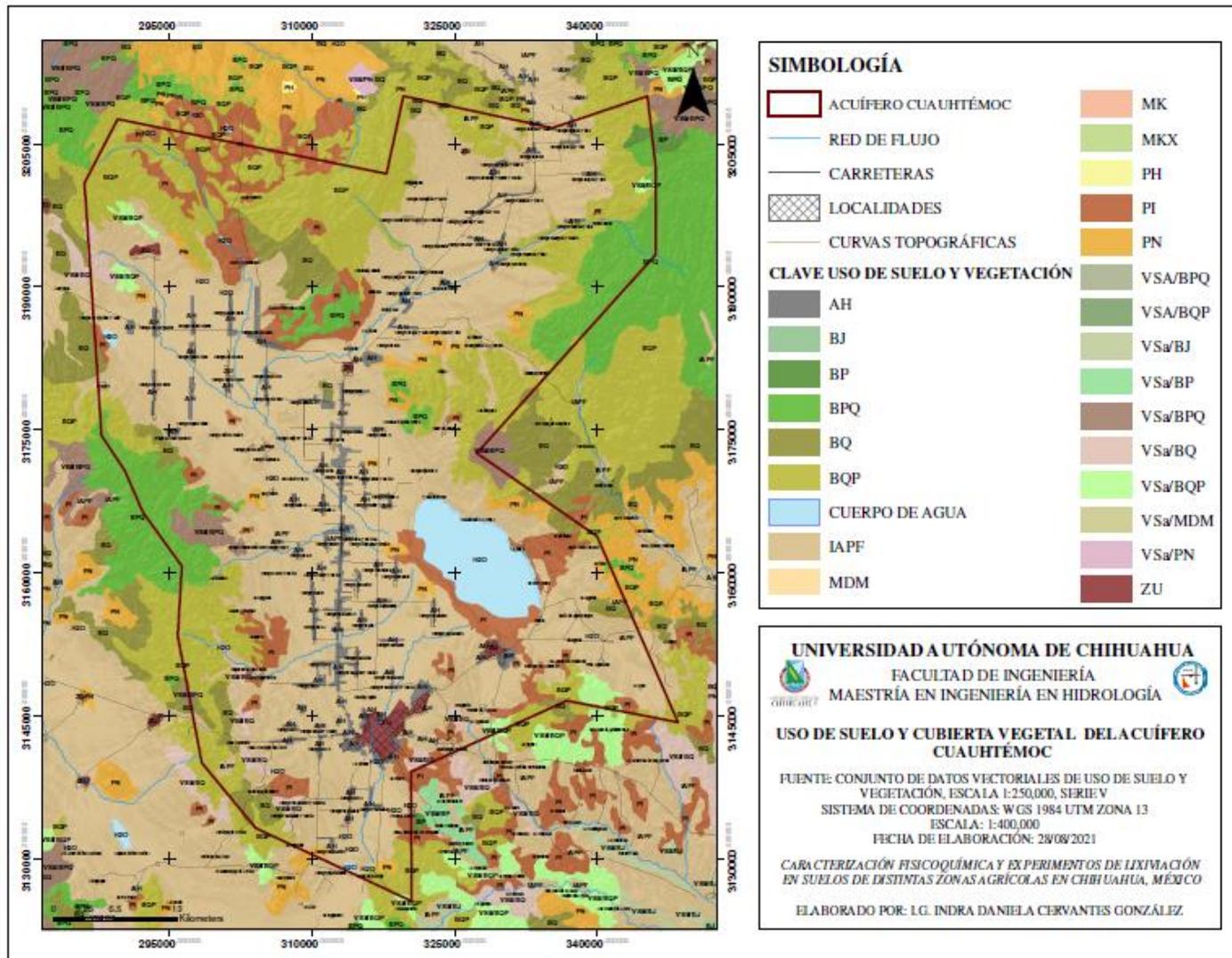


Figura 4. Uso de Suelo y Cubierta Vegetal del acuífero Cuahtémoc.

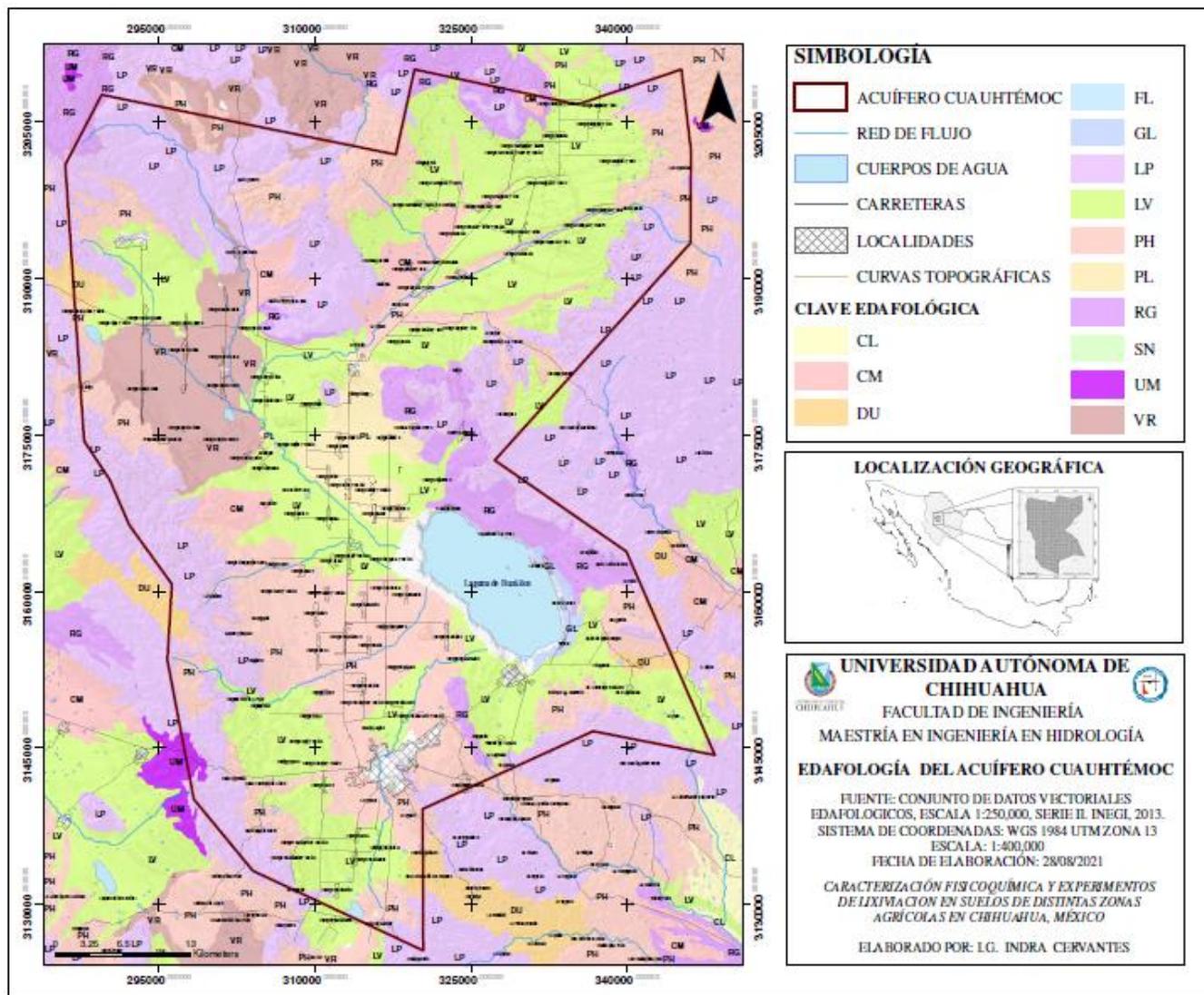


Figura 5. Edafología del acuífero Cuauhtémoc.

2.1.4.1 Textura del suelo

Existen tres códigos que describen la clase textural de los primeros 30 cm del suelo dominante según el INEGI (2013):

- *Gruesa (1)*. Suelos arenosos con más de 70% de arena, los cuales presentan menor capacidad de retención de agua y nutrientes para las plantas.
- *Media (2)*. Comúnmente llamados suelos francos, equilibrados en el contenido de arena, arcilla y limo.
- *Fina (3)*. Suelos arcillosos con más de 35% de arcilla, que tienen mal drenaje, escasa porosidad, son por lo general duros al secarse, se inundan fácilmente y son menos favorables al laboreo.

El 88.7 % del territorio corresponde a una textura media, el 7.3% a una textura fina y el 4% restante a una textura gruesa (Figura 6).

2.1.5 Geología

En el acuífero Cuauhtémoc se encuentran rocas sedimentarias, ígneas y en menor medida rocas metamórficas, todas ellas con edades que varían del Precámbrico hasta el Cuaternario (CONAGUA, 2013; INEGI, 2010). La actividad volcánica del Terciario es la una de las más evidentes en la región ya que se aprecian unidades volcánicas aflorando con potentes espesores. Además, se distinguen sistemas estructurales predominantemente de fallas normales y valles rellenos de material aluvial (Figura 7).

En el área se encuentran dos grandes secuencias correspondientes al intervalo Cretácico-Oligoceno, el primero de ellos es el Complejo Volcánico Inferior, compuesto en su mayoría por rocas andesíticas alteradas y afectadas estructuralmente, que alcanzan espesores arriba de los 3 km; el segundo es la Serie Volcánica Superior la cual presenta un espesor alrededor de 1.5 km, y se compone principalmente por una secuencia de ignimbritas pseudoestratificadas (CONAGUA, 2013; Alatorre *et al.*, 2014). Además, se observan una serie de bloques montañosos separados de amplios y extensos valles causados por fallas de tipo normal, con desplazamientos superiores a los 1,000 m.

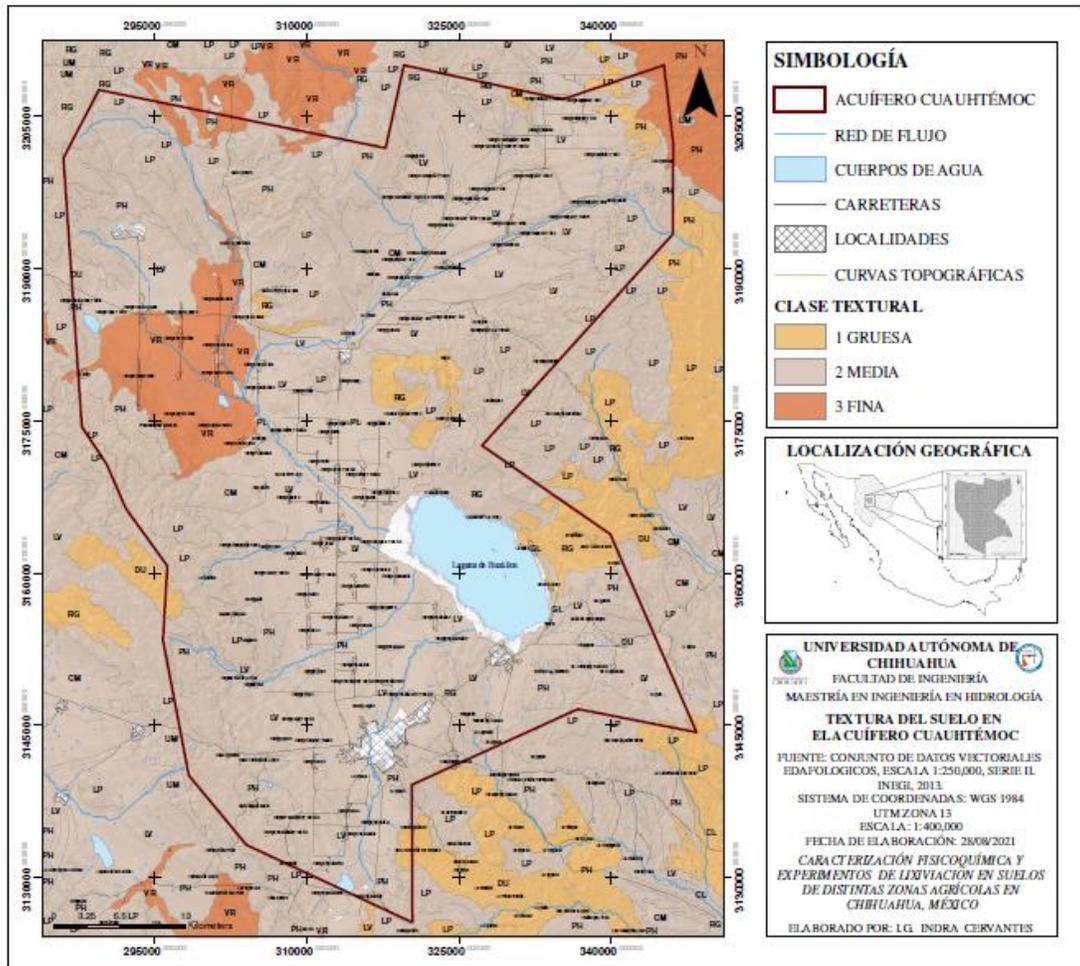


Figura 6. Textura del suelo en el acuífero Cuauhtémoc.

Las unidades se encuentran afectadas por estructuras de fallas y fracturas que han desplazado a las unidades a mayor profundidad, estas estructuras guardan una cierta dirección preferencial Noroeste-Sureste (Consultores en Agua Subterránea S.A., 2000).

Como parte del intemperismo y erosión de los materiales de las zonas altas, los materiales granulares que constituyen conglomerados fueron depositados en los valles con espesores variables desde escasos metros hasta más de 250 m (CONAGUA, 2013). Entre los materiales más recientes se encuentran los depósitos granulares que están dispuestos en la zona este del valle y que rellenan la fosa tectónica del Valle Cuauhtémoc – Anáhuac - Álvaro Obregón (Consultores en Agua Subterránea S.A., 2000).

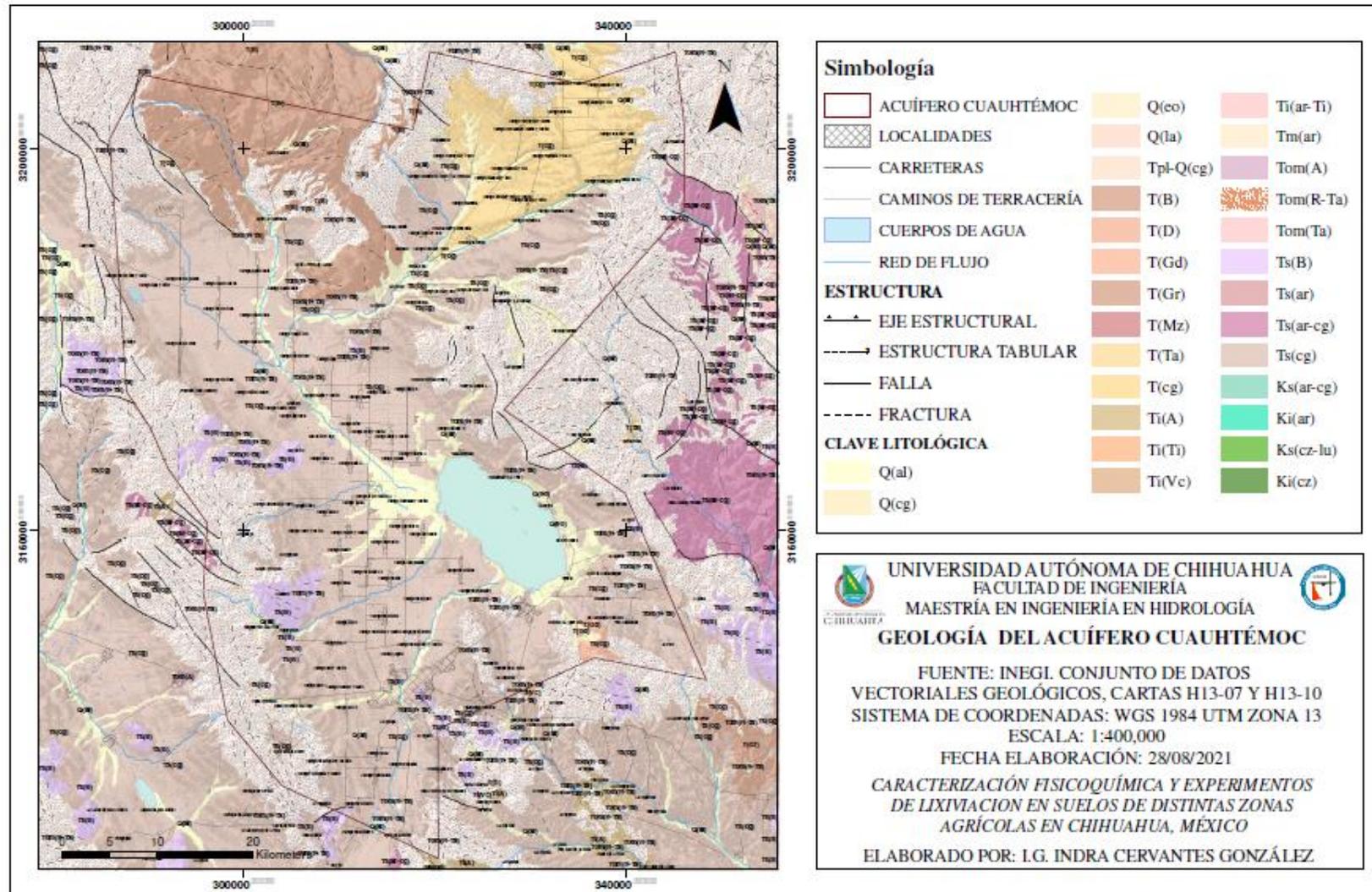


Figura 7. Geología del acuífero Cuauhtémoc.

2.1.6 Hidrogeología

De acuerdo con los datos recolectados a través de geofísica, evidencias geológicas e hidrogeológicas se definió el tipo de acuífero como acuífero libre, heterogéneo y anisótropo, conformado por un medio fracturado y otro granular, con interconexión hidráulica entre ellos. Las andesitas y basaltos, por su composición y poco fracturamiento constituyen una frontera al paso de agua subterránea en la zona norte (CONAGUA, 2018; Alatorre *et al.*, 2014). Verticalmente, la frontera superior es la posición del nivel freático y la inferior es la zona de permeabilidad baja de la roca volcánica fracturada, por lo que el movimiento del agua subterránea es mínimo (Consultores en Agua Subterránea S.A., 2000). El medio granular, que se encuentra en la porción superior del acuífero con un espesor aproximado de 350 m (aumenta en la parte central del valle), se compone principalmente por sedimentos aluviales, arcillosos y conglomerados; mientras el medio fracturado, el cual se encuentra en la parte inferior se compone de rocas volcánicas y sedimentarias fracturadas (CONAGUA, 2018).

En el año 2000, los Consultores en Agua Subterránea S.A., realizaron pruebas de bombeo en el acuífero y obtuvieron como resultados que la conductividad hidráulica horizontal oscila entre 0.15 y 9.32 m/día para el medio granular y 0.06 y 16.0 m/día para el medio fracturado, los valores mayores se encuentran en las porciones central y noroeste del Valle de Cuauhtémoc, valores que van de medios a bajos se observan en las estribaciones de las elevaciones localizadas al norte y suroeste del valle.

CONAGUA (2018) reporta que basado en las pruebas de bombeo realizadas en acuíferos colindantes se infiere que los valores de transmisividad varían de 6.9×10^{-5} a 15.8×10^{-3} m²/s, en tanto que la conductividad hidráulica se encuentra entre 3.974×10^{-2} m/día a 1.72 m/día, utilizando las características geológicas del área se definen los parámetros de coeficiente de almacenamiento y de rendimiento específico con valores que van de 1×10^{-5} a 0.01 y de 0.05 a 0.13 respectivamente (CONAGUA, 2018).

La recarga natural del acuífero se debe principalmente a la precipitación pluvial de toda el área de estudio, principalmente en las zonas serranas, donde se

infiltra y alimenta a través de flujo subterráneo horizontal al acuífero, otra fuente de recarga es la generada por retorno de riego. De acuerdo con los modelos conceptuales tradicionales la descarga del acuífero se efectúa a través de la evaporación y evapotranspiración relacionada con la Laguna de Bustillos, además de un flujo que sale en el sur, desafortunadamente además de la evaporación de la laguna, en la actualidad la descarga principal se realiza de manera artificial a través del bombeo de pozos agrícolas (Chávez, 2018).

2.1.7 Hidrogeoquímica

Considerando la capacidad de disolución del agua subterránea, que en su circulación a través de un medio poroso constituido por materiales con cierto grado de solubilidad incrementa su contenido de minerales disueltos, es posible asociar las trayectorias de flujo con el incremento de salinidad del agua, correspondiendo las zonas de menor concentración iónica a las de recarga y las mayores a las de descarga (Consultores en Agua Subterránea S.A., 2000).

Como parte de la investigación realizada por Chávez (2018), se llevó a cabo la toma de 30 muestras de agua en pozos localizados en el acuífero Cuauhtémoc. Determinó que se contaba con 6 familias de agua, la primera de ellas es la Bicarbonatada Cálcica (11 de 30 muestras), familia Bicarbonatada Cálcica Sódica en la cual se incluyen 9 muestras, Bicarbonatada Sódica Cálcica en la que se incluyen 4 muestras, Bicarbonatadas Sódicas, Bicarbonatadas Cálcicas Magnésicas y una sola muestra perteneciente a la familia Bicarbonatada Clorurada Cálcica, ubicada en la localidad de Anáhuac en la zona sur de la Laguna de Bustillos (Chávez, 2018).

Para evaluar la calidad de las aguas subterráneas empleadas para consumo humano, se comparan los valores obtenidos con los valores máximos establecidos en la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Dentro de los elementos detectados fuera de los límites permisibles se encuentra el **arsénico** (límite de 0.025 mg/L), 7 muestras presentan concentraciones fuera de los límites (Chávez, 2018), las mayores concentraciones se localizan en las zonas cercanas a la laguna (Figura 8a). Los resultados de **fluoruros** indican que 5 muestras están por

encima del límite, el cual es de 1.5 mg/L, la concentración de fluoruros aumenta su concentración según se avanza hacia el norte donde se encuentra el valor más alto de 3.4 mg de F/L (Figura 8b). En el caso de los **nitratos**, los pozos con concentraciones elevadas se muestran de forma puntual con valores altos en la localidad Seis de Enero (47.9 mg/L), situada en el límite sur-poniente del acuífero, así como también en las pequeñas comunidades ubicadas al oriente de la Laguna de Bustillos (Figura 8c), este alto contenido de nitratos se presume está relacionado con la ausencia de sistema de alcantarillado, por lo que el uso de fosas sépticas es la razón que se antoja más factible (Chávez, 2018).

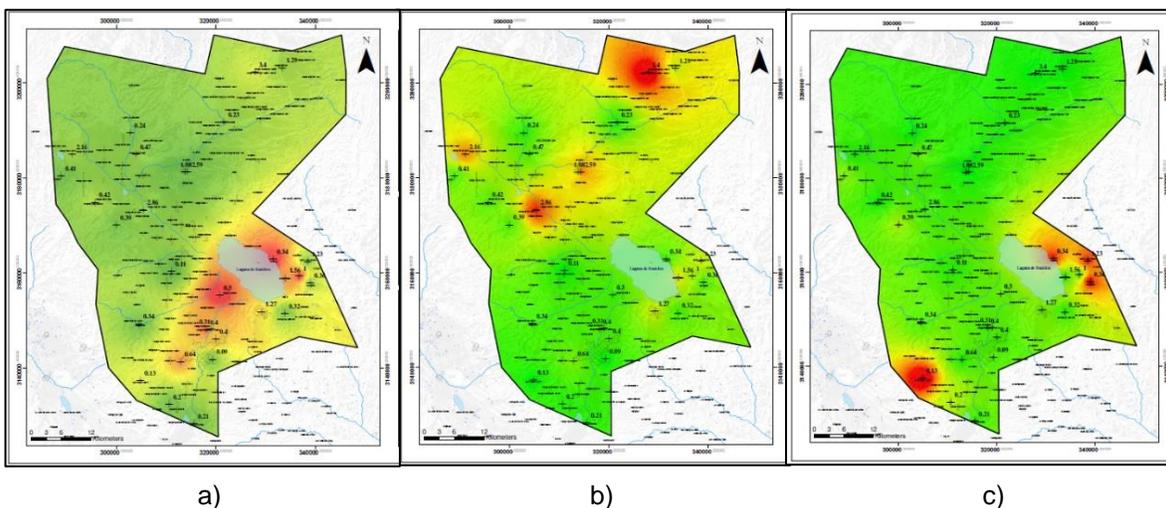


Figura 8. Concentración de a) arsénico, b) fluoruros y c) nitratos (Modificado de Chávez, 2018).

El resto de los parámetros se encuentra dentro de los límites establecidos, los rangos de temperatura varían de 18 a 25°C, teniendo un promedio de 22°C y la temperatura más constante es de 23°C. La conductividad eléctrica se encuentra entre 204 y 973 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo el valor más alto el obtenido en el pozo de Anáhuac, este parámetro se encuentra estrechamente relacionado con la presencia de Sólidos Disueltos Totales, para este punto se tiene el valor máximo obtenido en este parámetro con un valor de 681 mg/L, cabe mencionar que en el área se encuentra localizada la industria de papelera Copamex.

2.2 Buenaventura

2.2.1 Localización y vías de acceso

El área se encuentra localizada en la zona noroeste del estado de Chihuahua, a aproximadamente 273 km de la capital del estado, cubriendo una extensión de 3,034.82 km² con un perímetro de 300.47km. Geográficamente se encuentra localizado entre las coordenadas 243,706.656 E, 3,384,466.546 N, 273,161.896 E y 3,279,716.031 N (Figura 9).

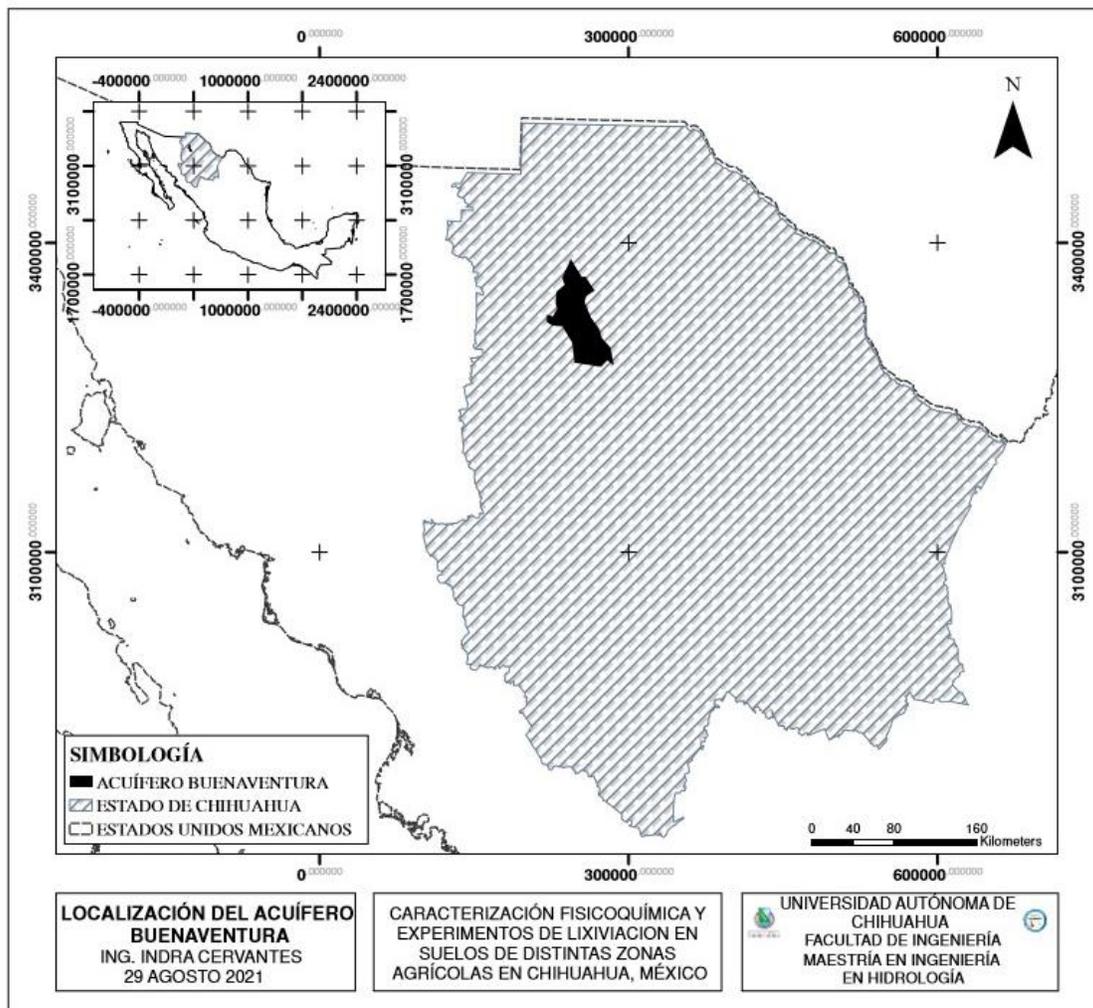


Figura 9. Localización geográfica del acuífero Buenaventura.

Administrativamente, el acuífero limita al noreste con el acuífero de Laguna de Santa María, al noroeste con el acuífero Casas Grandes, al este con Laguna La Vieja, al sureste con Santa Clara, al sur con Baja Babícora y al suroeste con Ignacio Zaragoza.

La vía de acceso principal desde la capital del estado está determinada por la carretera Federal No. 45 que comunica a la ciudad de Chihuahua con Cd. Juárez, aproximadamente a 80 km desde Chihuahua se toma la salida al oeste en la desviación a Flores Magón (cuota), pasando por la caseta Ojo Laguna, posterior a esto se continúa por la carretera 7D por 76 km hasta llegar a Flores Magón, donde se tomará la carretera México 10 por 55 km. Otra forma de llegar es desde la autopista Chihuahua a Cuauhtémoc (carretera Federal No. 16), tomando en esta última el corredor comercial que va de sur a norte, llegando a la colonia Álvaro Obregón se toma la desviación al oeste para llegar a la colonia Vianna y de ahí dirigirse hacia el norte por 143 km hasta llegar a la carretera México 10 por 40 km al oeste.

2.2.2 Clima

De acuerdo con el Gobierno del Estado de Chihuahua, la zona de estudio se encuentra dominada por un clima semiárido, de manera general se considera que predomina un tipo de clima seco extremoso, con una temperatura media de 12 a 18°C, con temperaturas de entre 3 y 18°C en los meses más fríos y calurosos respectivamente, y una precipitación promedio que va de los 200 a 400 mm anuales (UNITECNIA S.A de C.V., 1999). De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2020), la temperatura media anual varía de 15.6 a 17.5° C, siendo el período de mayores temperaturas los meses junio, julio y agosto, y enero y diciembre los meses más fríos.

Por otra parte, tomando en cuenta la clasificación hecha por Köppen, adaptada para México por Enriqueta García (García, 1964), el clima dominante de la zona es árido-muy árido, dominando el BSokw, el cual es un clima árido, templado, con veranos cálidos, se encuentra en la porción norte del acuífero, es el clima más seco dentro de este grupo (Figura 10). Además, el clima BWkw, cubre casi una tercera parte del territorio (dentro de la parte central del acuífero, específicamente la zona de la llanura), se caracteriza por ser un clima muy árido, templado, con temperaturas medias anuales que varía entre 12°C y 18°C. Los porcentajes y áreas de cobertura se indican en la Tabla A17 del Anexo A.

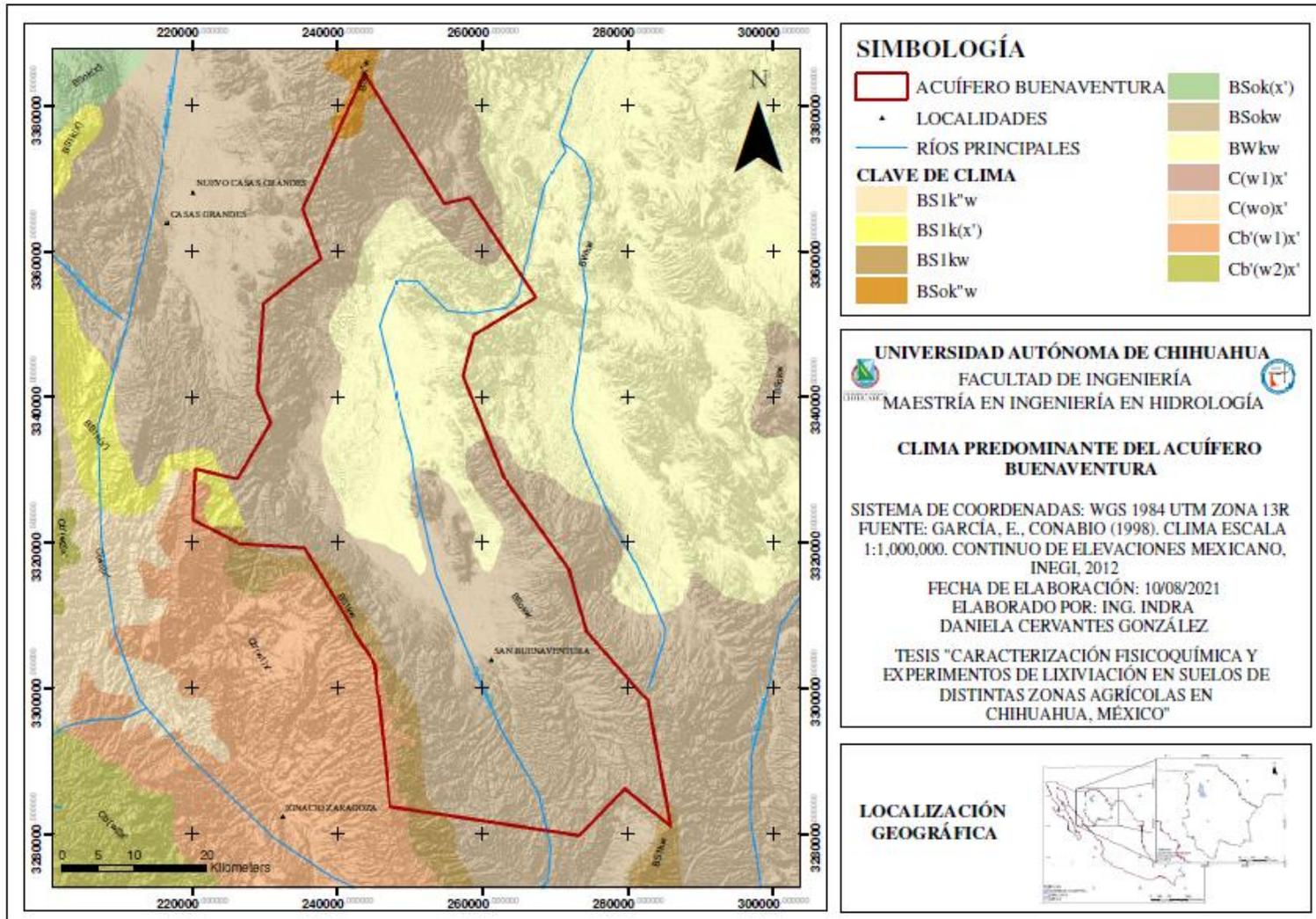


Figura 10. Clima predominante del acuífero Buenaventura.

2.2.3 Uso de Suelo y cubierta Vegetal

Los cambios en la calidad y cantidad de la cubierta vegetal pueden generar variaciones en la composición y densidad de las especies, afectando su estructura y funcionamiento, lo que a su vez provoca efectos negativos sobre su posible aprovechamiento sostenible (Romero, 2019).

Para el análisis de la cobertura del suelo se tomó la información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el *Conjunto de Datos Vectoriales* de la carta de *Uso de Suelo y Vegetación* serie VI, escala de 1:250,000.

En la Tabla B19 del Anexo B se muestran los porcentajes de cobertura que abarca cada uso de suelo y vegetación. De manera general se puede afirmar que domina el pastizal natural (PN), con casi una tercera parte del territorio, si se considera además la vegetación secundaria del mismo (VSa/PN) se alcanza el 40% de cobertura del área, principalmente en la parte centro sur del acuífero (Figura 11). Los pastizales naturales están conformados por un grupo donde predominan gramíneas y gramínoideas, en ocasiones acompañadas por hierbas y arbustos de diferentes, su principal área de distribución se localiza en la zona de transición entre los matorrales xerófilos y los diversos tipos de bosques (INEGI, 2017).

Posterior a los pastizales, la cobertura que cuenta con poco menos del 10% es el uso agrícola – pecuario – forestal. La actividad económica más importante en la región es la agricultura, destacando algodón, avena, chile, sorgo grano, alfalfa, maíz y frijol, le sigue en importancia la ganadería, de la cual existen varios criaderos de ganado.

2.2.4 Edafología

El suelo es una mezcla suelta y porosa de materiales, formado a partir de la agregación de partículas de suelo orgánicas e inorgánicas que forman una cubierta efímera en la superficie terrestre, su origen está dado de acuerdo con las condiciones ambientales, por alteraciones físicas, químicas y biológicas que actúan sobre residuos orgánicos, materiales geológicos y productos antropogeomórficos (FAO, 1999).

En el acuífero de Buenaventura el tipo de suelo predominante es el Leptosol con más del 35% de cobertura (Tabla C23 del Anexo C y Figura 12). Este tipo de suelo es considerado como un suelo con limitantes para el desarrollo agrícola, son suelos jóvenes muy someros (alrededor de 25 cm de profundidad), cabe mencionar que a nivel nacional este es el tipo de suelo dominante.

2.2.4.1 Textura del suelo

Dentro de los tres códigos que describen la clase textural de los primeros 30 cm del suelo dominante según el INEGI (2013) descritos en el apartado 2.1.4.1.

- *Gruesa (1)*. Suelos arenosos con más de 70% de arena. Para este tipo de textura, la zona de estudio está cubierta casi en un tercio;
- *Media (2)*. Textura dominante en el acuífero, cubriendo más de la mitad de la superficie de interés.
- *Fina (3)*. Suelos arcillosos con más de 35% de arcilla, que tienen mal drenaje, escasa porosidad, son por lo general duros al secarse, se inundan fácilmente y son menos favorables al laboreo. Con textura fina se cubre 7.37% de la superficie del acuífero (Figura 13).

2.2.5 Geología

En el área de estudio predominan las rocas ígneas (volcánicas en su mayoría) y aluviones. Estos últimos están localizados en la planicie del valle de Buenaventura, y de acuerdo con información obtenida a través de perforaciones de pozos, el material está conformado en su mayoría por arenas, gravillas y gravas con zonas de intercalación de material arcilloso (Figura 14).

Esta zona del valle constituye la zona de explotación del acuífero por lo que las condiciones de permeabilidad y conductividad varían de acuerdo con el contenido de arcillas (CONAGUA, 2020).

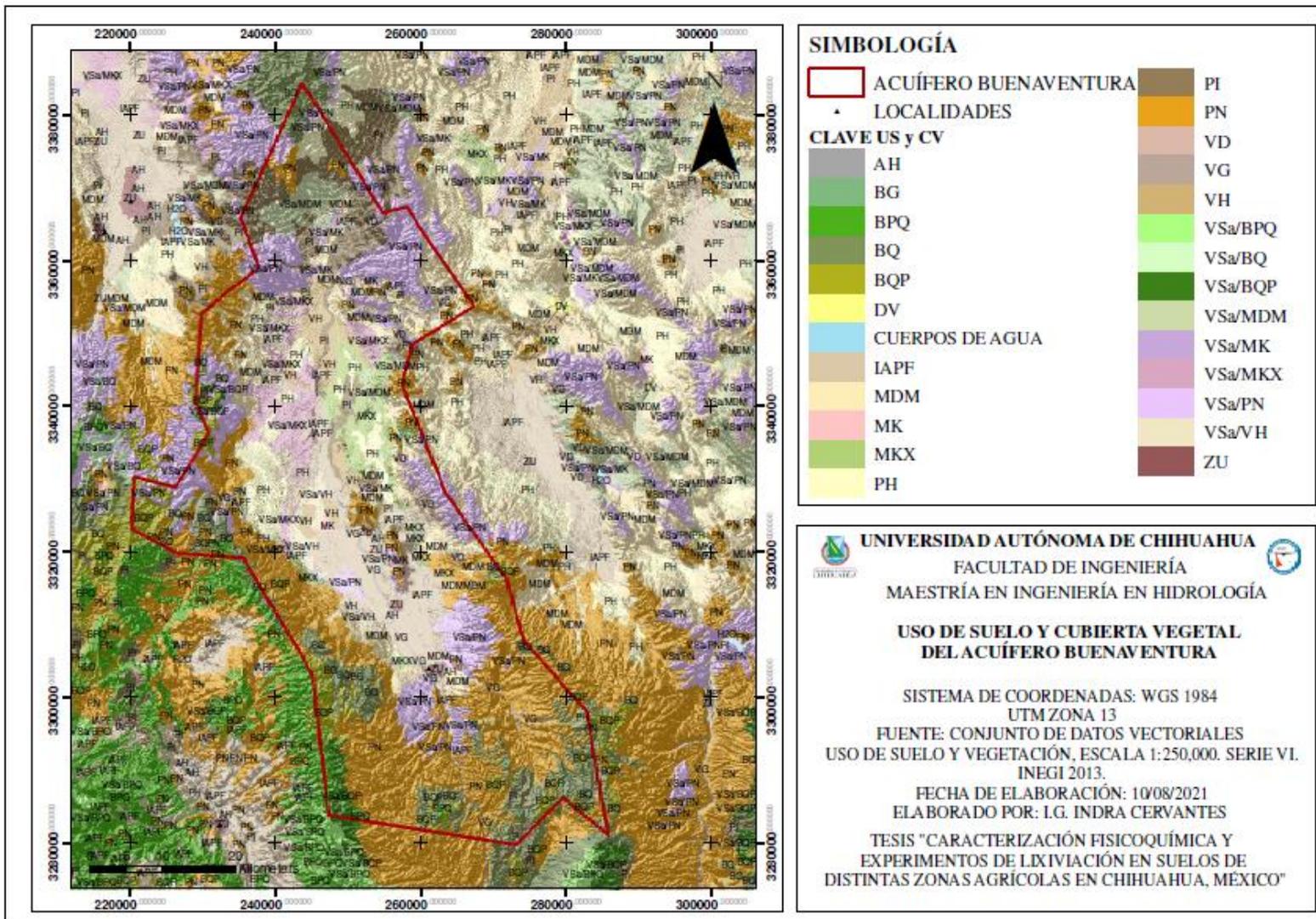


Figura 11. Uso de suelo y cubierta vegetal predominante en el acuífero Buenaventura.

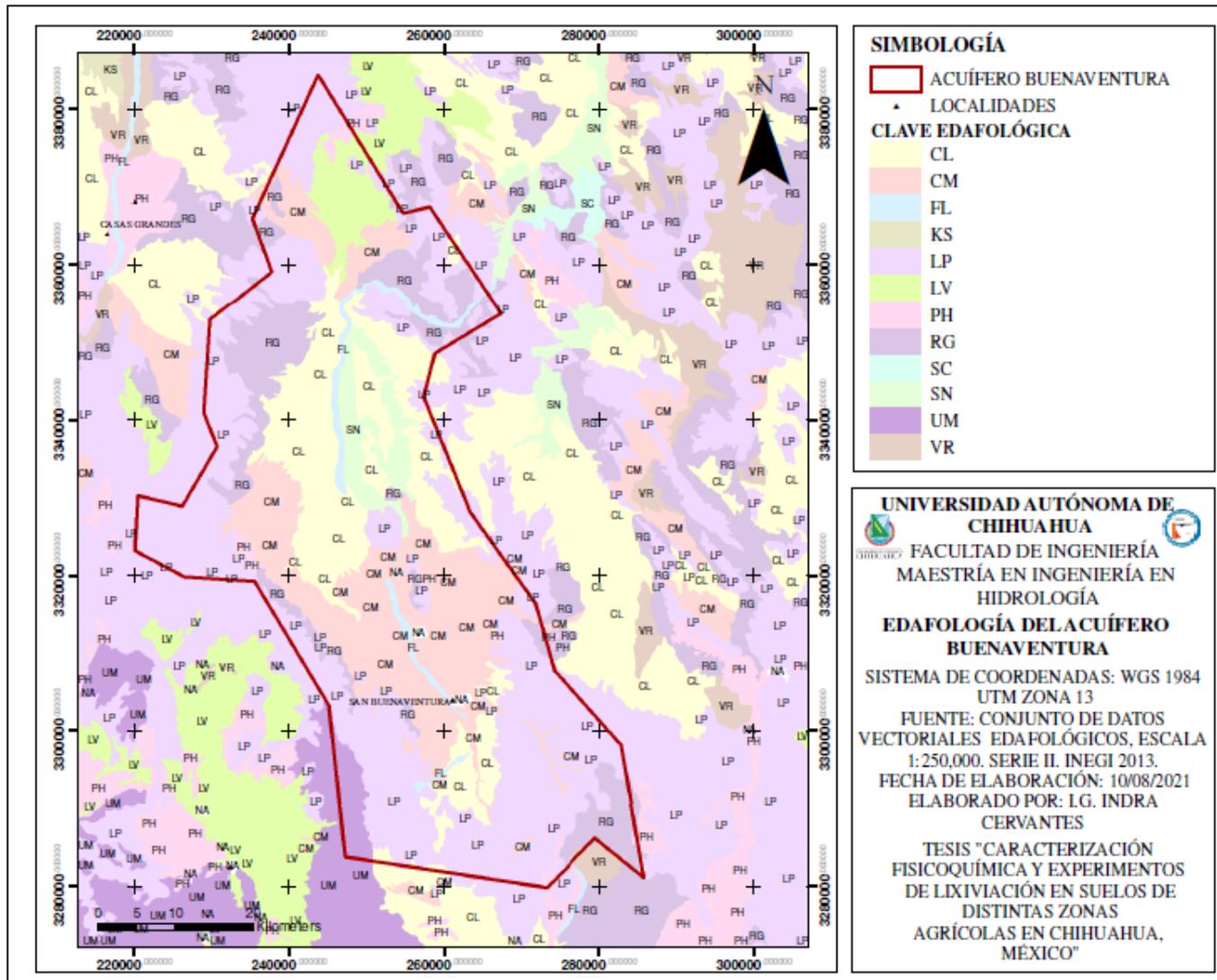


Figura 12. Edafología del acuífero Buenaventura.

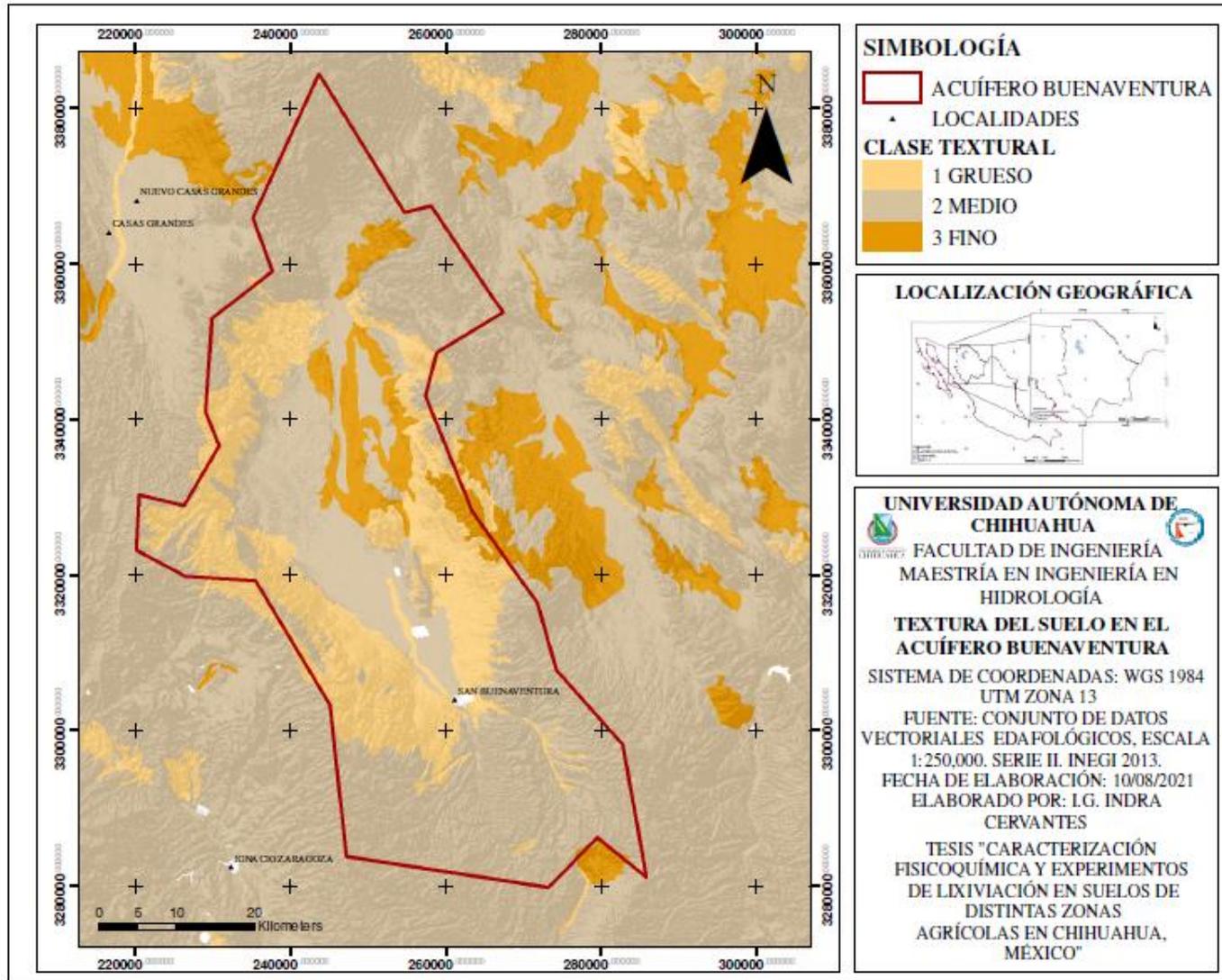


Figura 13. Textura dominante del suelo en el acuífero Buenaventura

Además del material aluvial, se tienen depósitos fluviales localizados a lo largo del Río Santa María y el arroyo San Joaquín, este material está constituido por limos, arenas, arcillas, gravas y cierto porcentaje de cantos rodados, esto favorece la infiltración de agua hacia el subsuelo, constituyendo áreas de recarga del acuífero (CONAGUA, 2020).

La cuenca se originó a partir de los movimientos provocados durante la orogenia Laramide, cuyos movimientos dieron lugar a la generación de desplazamientos, así como a deposición de material volcánico, tanto intrusivo como extrusivo, este material forma parte de la unidad de material que corona la Sierra Madre Occidental (Romero, 2019).

Como parte del material ígneo localizado en la zona, se tienen elevaciones aisladas de basaltos, andesitas basálticas, riolitas y rocas masivas silíceas. Las riolitas, tobas, algunas capas de ceniza volcánica y capas de andesita basáltica se localizan formando las sierras que delimitan el valle (CONAGUA, 2020). Hacia los costados se cuenta con una secuencia que incluye secuencias ignimbríticas riolíticas intercaladas con derrames dacíticos y riolíticos, en menor cantidad se tienen basaltos que se emplazaron en un basamento antiguo que incluye rocas proterozoicas (Albrecht y Goldstein, 2000).

En la zona oeste se tienen lavas de composición basáltico-andesítica, las cuales fueron emplazadas de manera discontinua inmediatamente después de cada episodio ignimbrítico (Ferrari *et al.*, 2005). Estas lavas se distribuyen en dirección NNE en afloramientos que van desde San Buenaventura, Chihuahua hasta Navojoa, Sonora. Dichos afloramientos forman parte de los Basalto-Andesitas del Sur de la Cordillera (SCORBA por sus siglas en inglés), propuestos por Cameron *et al.* (1989), como una serie regional que se extiende también a Arizona y Nuevo México. En algunos sitios las tobas riolíticas soldadas presentan estructuras columnares, debido al fracturamiento, este fracturamiento funciona como permeabilidad secundaria, ya que permite trasminar el agua de lluvia hacia el acuífero (Romero, 2019).

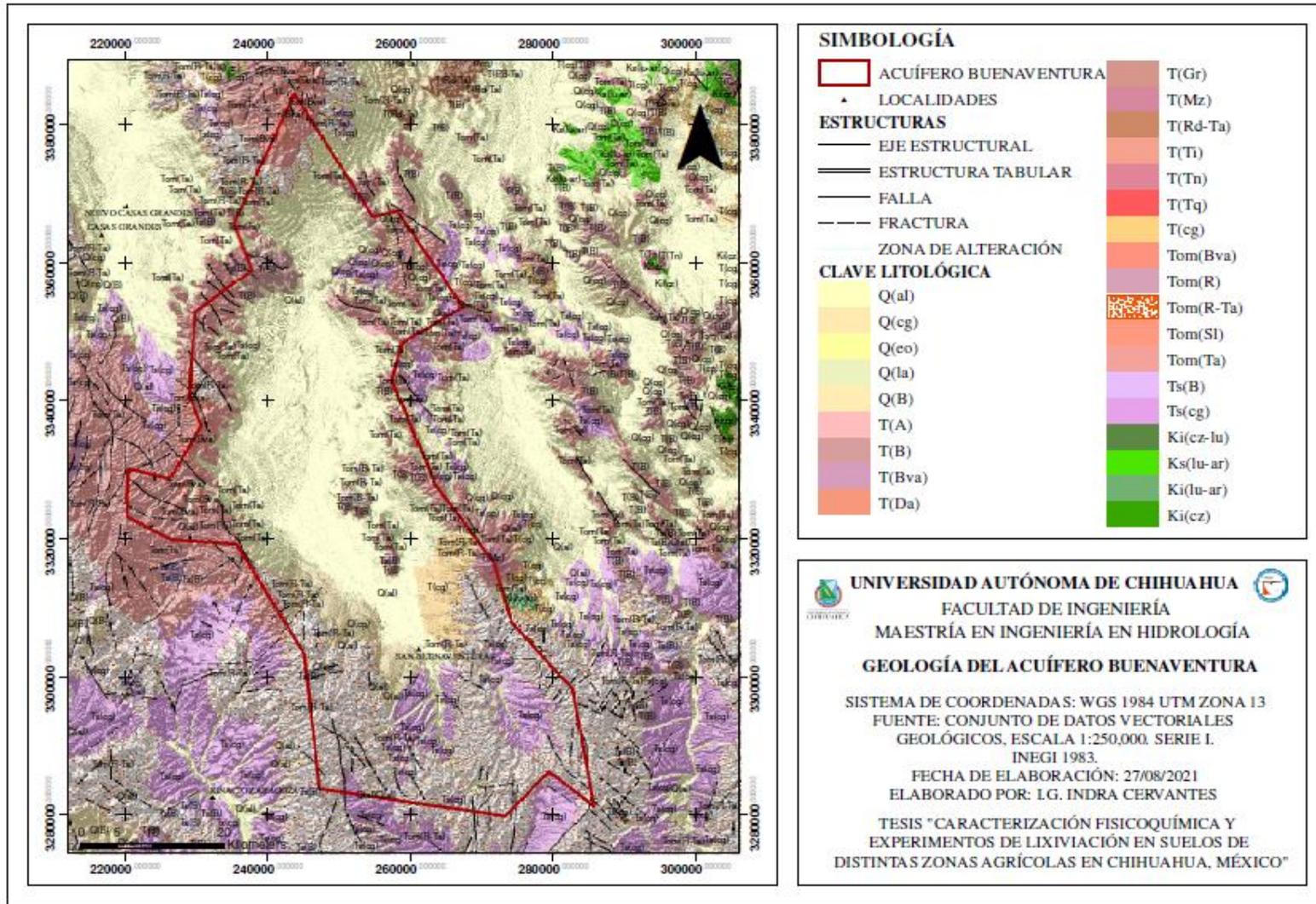


Figura 14. Geología del acuífero Buenaventura.

2.2.6 Hidrogeología

El acuífero de Buenaventura se encuentra localizado dentro de una zona caracterizada por ser un área desértica de la que sobresalen bloques montañosos, separados por valles. La información geológica e hidrogeológica disponible permite establecer que el área de estudio principalmente está emplazada en materiales del Cuaternario (CONAGUA, 2020), constituidos por material aluvial y fluvial, los cuales tienen gran importancia desde el punto de vista geohidrológico, pues en ellos se realiza la explotación de aguas subterráneas.

El acuífero se considera del tipo libre, ya que la presión que tiene a profundidad es igual a la presión atmosférica, por lo que su nivel piezométrico coincide con la línea de saturación (Peña, 2006). Cabe destacarse que existe cierto confinamiento en la parte norte de la cuenca, en las cercanías de la población de Galeana. Las zonas de recargas del acuífero se concentran en los lechos del río y sus afluentes, así como en sierras que circundan al valle como son las Del Cristo y La Catarina. La dirección de flujo subterráneo se considera paralela al cauce del Río Santa María (CONAGUA, 2020).

Se tiene información de los parámetros hidráulicos a partir de 12 pruebas de bombeo, de acuerdo con el documento de Disponibilidad (CONAGUA, 2020), estas pruebas fueron realizadas en el año 1974 y en ellas se obtuvieron valores de transmisividad del orden de 0.22×10^{-3} a 17.1×10^{-3} m²/s, además, se tiene registro de 6 pruebas realizadas en 1981 en la que se registraron valores promedio de 4.19×10^{-3} m²/s.

Dentro de la información piezométrica Romero (2019), muestra una distribución de curvas de profundidades del nivel estático, donde se midieron un total de 46 pozos en el acuífero Buenaventura, siendo la profundidad máxima 55 metros localizada en la parte centro sur del acuífero.

2.2.7 Hidrogeoquímica

En 2019, Romero realizó un análisis de agua del acuífero, con el que determinó que la calidad del agua de consumo humano en general es adecuada, y solo algunas muestras presentan valores ligeramente superiores respecto al As

mientras que la mayoría de las muestras presentan valores por arriba de 1.5 mg/l de flúor que es el límite permisible establecido en la NOM 127-SSA 1994, este alto contenido se le atribuye al contacto del agua con rocas ígneas. Para disminuir la ingesta y exposición a estas concentraciones se recomienda consumir agua tratada por el método de ósmosis inversa, siendo el proceso más adecuado en relación costo/eficiencia.

Para las muestras tomadas de pozos utilizados para el riego agrícola se clasificaron utilizando un diagrama de Wilcox, y de acuerdo con las normas del Laboratorio de Suelos de Estados Unidos, el agua de pozos agrícolas es de baja a mediana salinidad y bajo sodio, lo que la hace una adecuada agua para desarrollar la actividad agrícola (Romero, 2019).

En la zona se tienen 3 familias de agua dominantes, la primera de ellas es Aguas Bicarbonatadas Sódicas Cálcidas Magnésicas, Aguas Bicarbonatadas Sódicas y Aguas Bicarbonatadas-Mixtas, esta última se localizan en la parte centro sur del Distrito de Riego 042 (Romero, 2019).

2.3 Meoqui-Delicias

2.3.1 Localización y vías de acceso

El acuífero Meoqui-Delicias tiene un área aproximada de 4,829 km² y abarca la zona de riego del Distrito de Riego 005, Ciudad Delicias (CNA, 2005) localizada a poco más de 87 km de la capital del estado, por lo que el área se encuentra ubicada en la porción centro sureste del estado de Chihuahua (Figura 15).

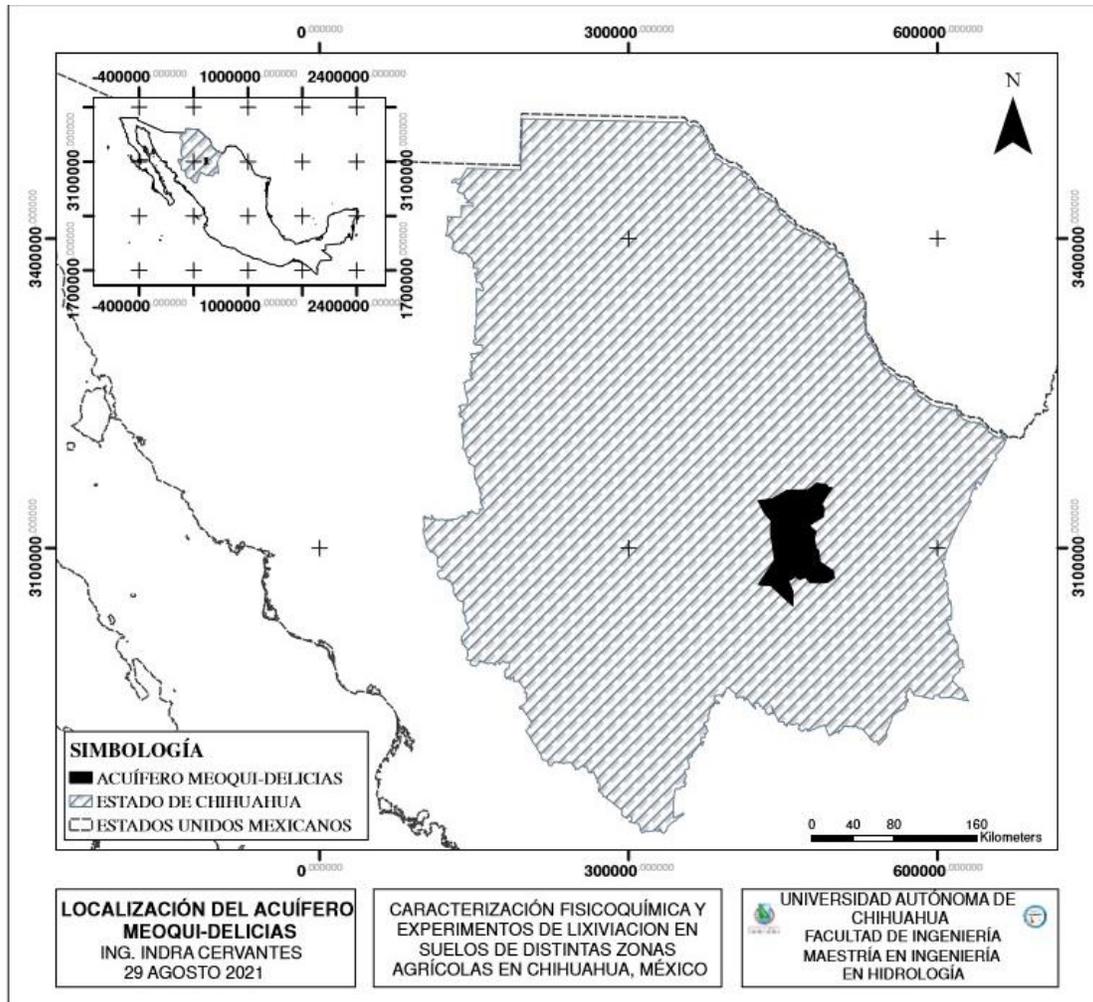


Figura 15. Localización geográfica del acuífero Meoqui Delicias.

La vía de acceso principal es a través de la carretera Federal México 45, con dirección Chihuahua – Delicias, la cual atraviesa de NNE a S, adicional a esta se encuentra la carretera Satevó-Delicias CHIH 22 que intercepta la carretera México 45 a la altura de Delicias, siendo la distancia desde San Francisco Javier de Satevó aproximadamente 74 km.

2.3.2 Clima

Según el sistema de clasificación climática desarrollado por Köppen y modificado por la M. C. Enriqueta García para la República Mexicana (1990), dentro de la zona del acuífero Meoqui Delicias existen tres diferentes tipos de climas BWhw, BSohw y BSokw, los cuales que van de áridos a super áridos (Figura 16), siendo el clima dominante el BSohw, el cual es un clima árido, semicálido que cubre el 59.28% del territorio total del acuífero. La información de cobertura en área y porcentaje se encuentra en la Tabla A17 del Anexo A.

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAUA, 2005), la temperatura media anual en la estación climatológica de Delicias es de 20.1°C, con mínima media de 6.4°C y máxima media de 33.7°C, la precipitación media anual en la misma estación es de 284 mm, estos datos se estimaron con un período de 1990 a 2004. La evaporación total anual es de 3,066 mm utilizando una serie de datos que va de 1992 al 2003.

2.3.3 Uso de Suelo y cubierta Vegetal

En el área de estudio se distribuye una gran cantidad de especies y comunidades vegetales naturales como los bosques, matorrales y pastizales, además de grandes extensiones de terrenos dedicados a actividades agrícolas y ganaderas, así como también asentamientos humanos y zonas urbanas.

En la zona de estudio se tiene casi una tercera parte cubierta por matorral desértico micrófilo (MDM) (Figura 17), estos son propio de terrenos planos, el MDM agrupa las comunidades en que las plantas la vegetación corresponden a arbustos de hoja o foliolo pequeño, estas agrupaciones son las que ocupan la mayor parte de la extensión de las regiones áridas de México (Mora-Donjuán *et al.*, 2013). En una proporción muy cercana se encuentra el suelo destinado a Uso Agrícola, Pecuario y Forestal (IAPF), debido a que en la región se tiene el Distrito de Riego DR 005. En la Tabla B20 del Anexo B se detalla la información de la cobertura del área.

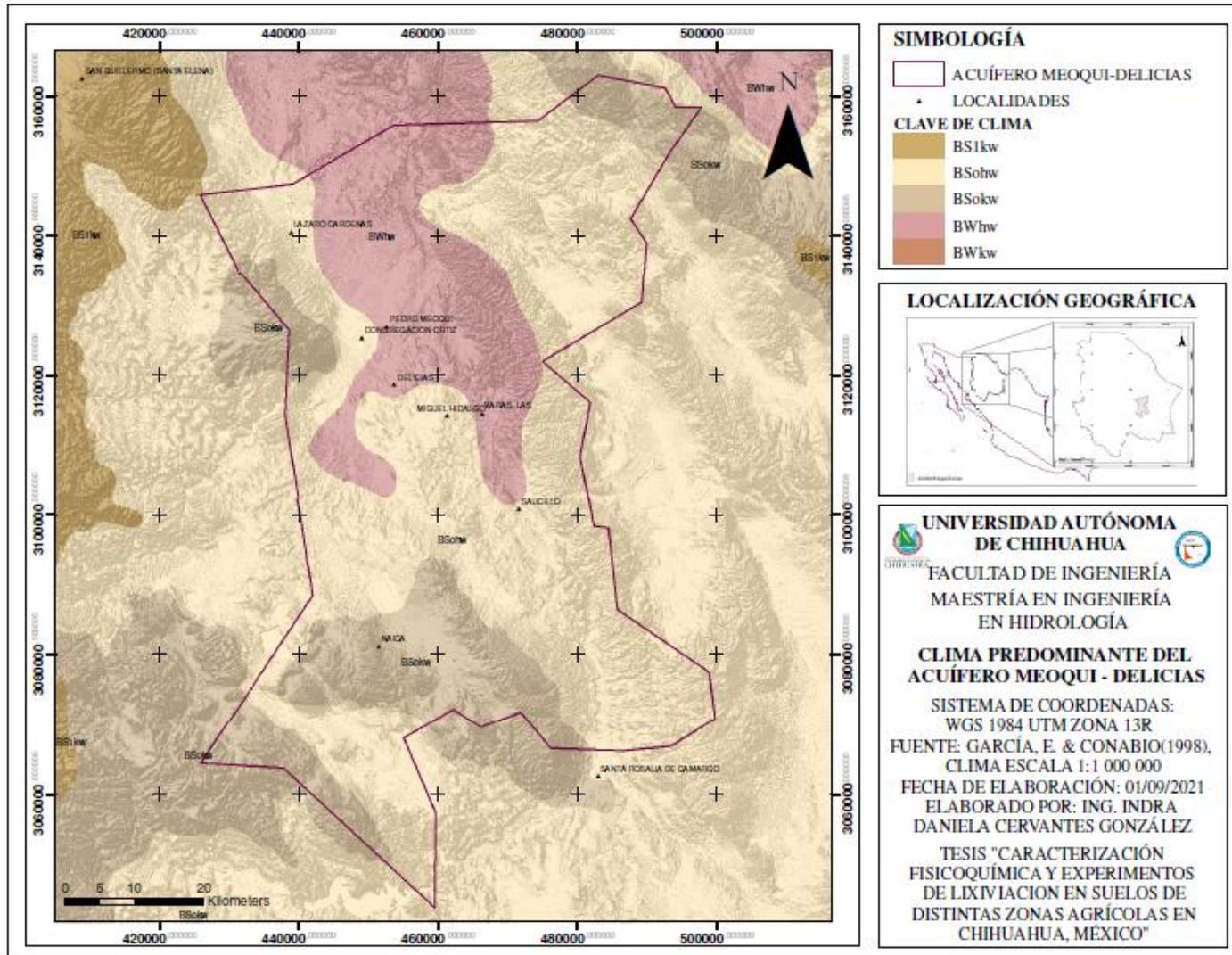


Figura 16. Clima predominante del Acuífero Mecoqui – Delicias.

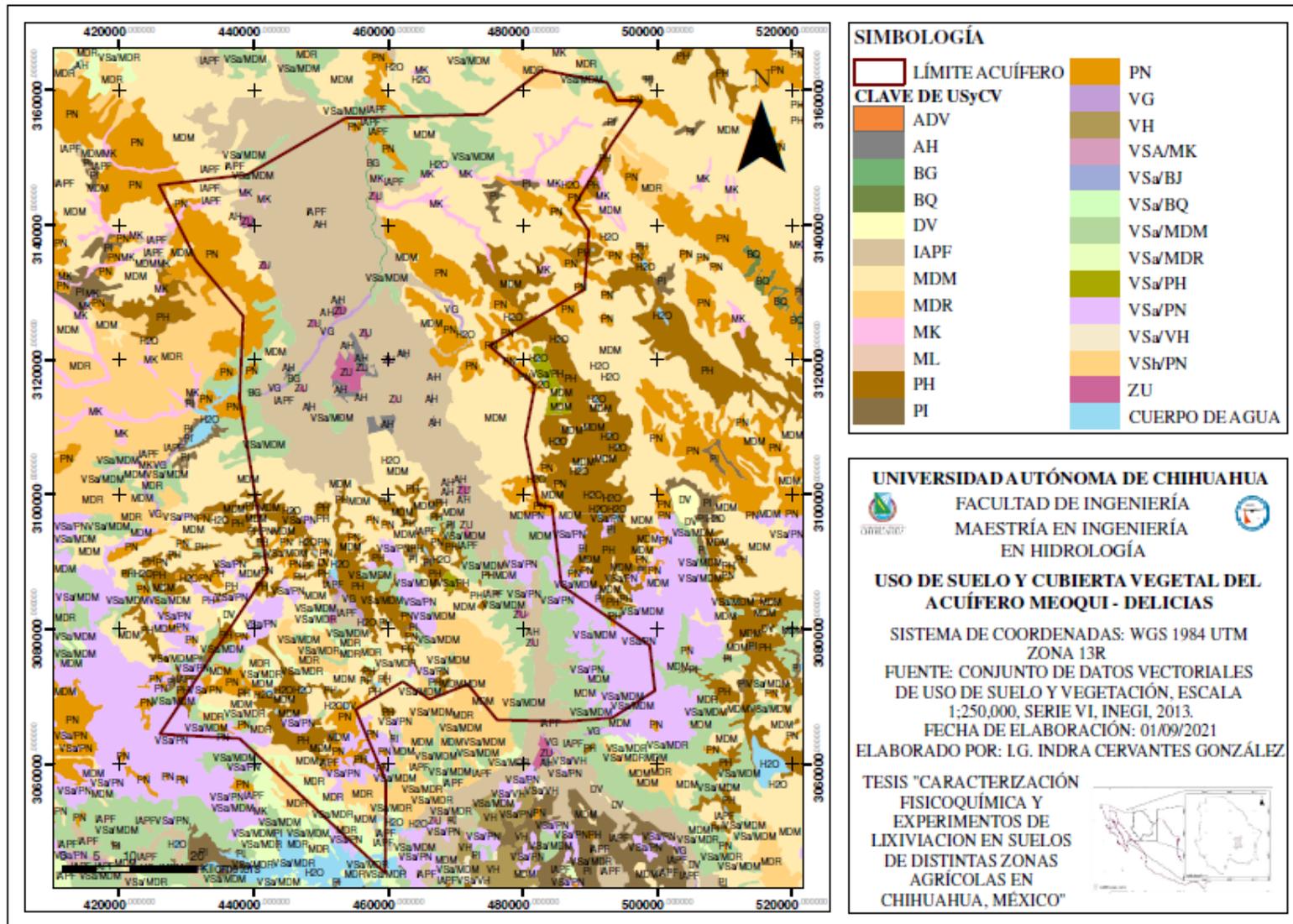


Figura 17. Uso de suelo y cubierta vegetal del acuífero Mecoqui Delicias.

2.3.4 Edafología

Los suelos predominantes en el área de estudio son suelos de tipo aluvial, los cuales, por haber sido intemperizados bajo condiciones climáticas áridas, han sufrido pocas alteraciones (CONAGUA, 2005). Entre las alteraciones o cambios que pueden mencionarse, se destaca la acumulación de carbonato de calcio y sales de sodio que, a causa de un drenaje deficiente característico en esta región, se han acumulado en depósitos de materiales solubles dando origen a suelos salinos y/o sódicos (CONAGUA, 2005).

Entre los suelos dominantes del área se encuentran el Calcisol cubriendo un 38.20% de la superficie, localizado principalmente en las zonas norte y sur de acuífero, además, se tiene la presencia de suelos Leptosoles, el cual cubre el 18.42% de la superficie localizándose en su mayoría en la zona este del área.

Las descripciones antes mencionadas, se obtuvieron de la Carta edafológica del INEGI (2013), en la Tabla C24 del Anexo C se indican los porcentajes de cada tipo de suelo, así como en la Figura 18 su distribución espacial.

En cuanto a la textura del suelo, en la parte sur se localizan algunas zonas de texturas gruesas, y en la zona sur y algunos áreas aisladas en el este del acuífero se tiene una textura fina, mientras que de manera predominante se tienen la textura media cubriendo tres cuartas partes de la superficie total, seguida por la textura fina y posteriormente la gruesa con un 6.6% (Figura 19), en algunos puntos coincide el límite de las áreas de riego con los cambios de textura, lo que indica que el tipo de suelo influyó en la delimitación de zonas homogéneas que posteriormente se agruparon en módulos de riego (CONAGUA, 2005).

2.3.5 Geología

A principios del terciario, todo el noroeste de México fue afectado por los esfuerzos compresionales del evento laramídico, estos esfuerzos actuaron de manera perpendicular y fueron acompañados de intrusión de rocas ígneas (Aranda, 1980). Las rocas se encuentran afectadas por fallamiento normal con orientación predominante noroeste sureste, característico de la provincia Sierras y Cuencas (Figura 20).

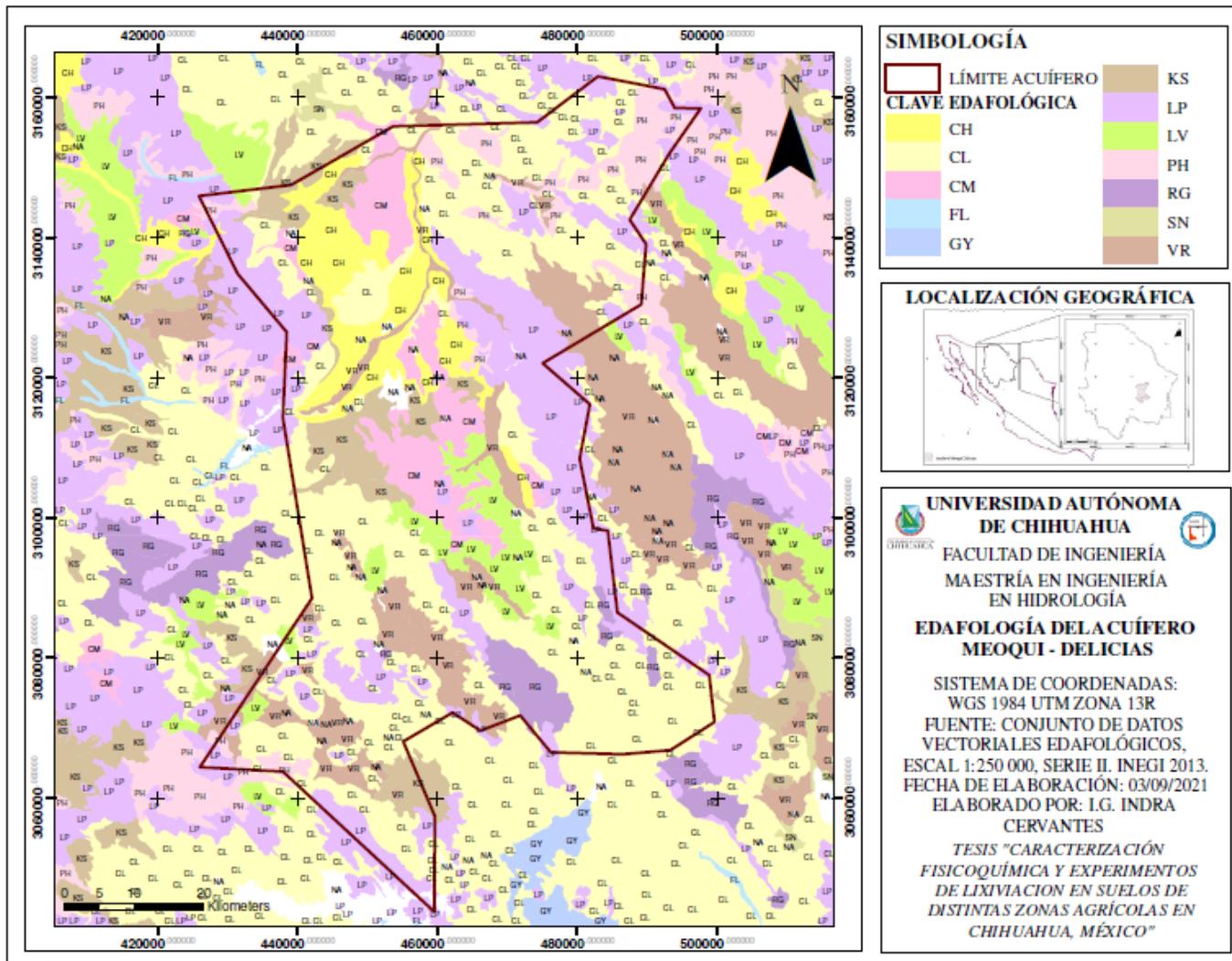


Figura 18. Edafología del acuífero Meoqui – Delicias.

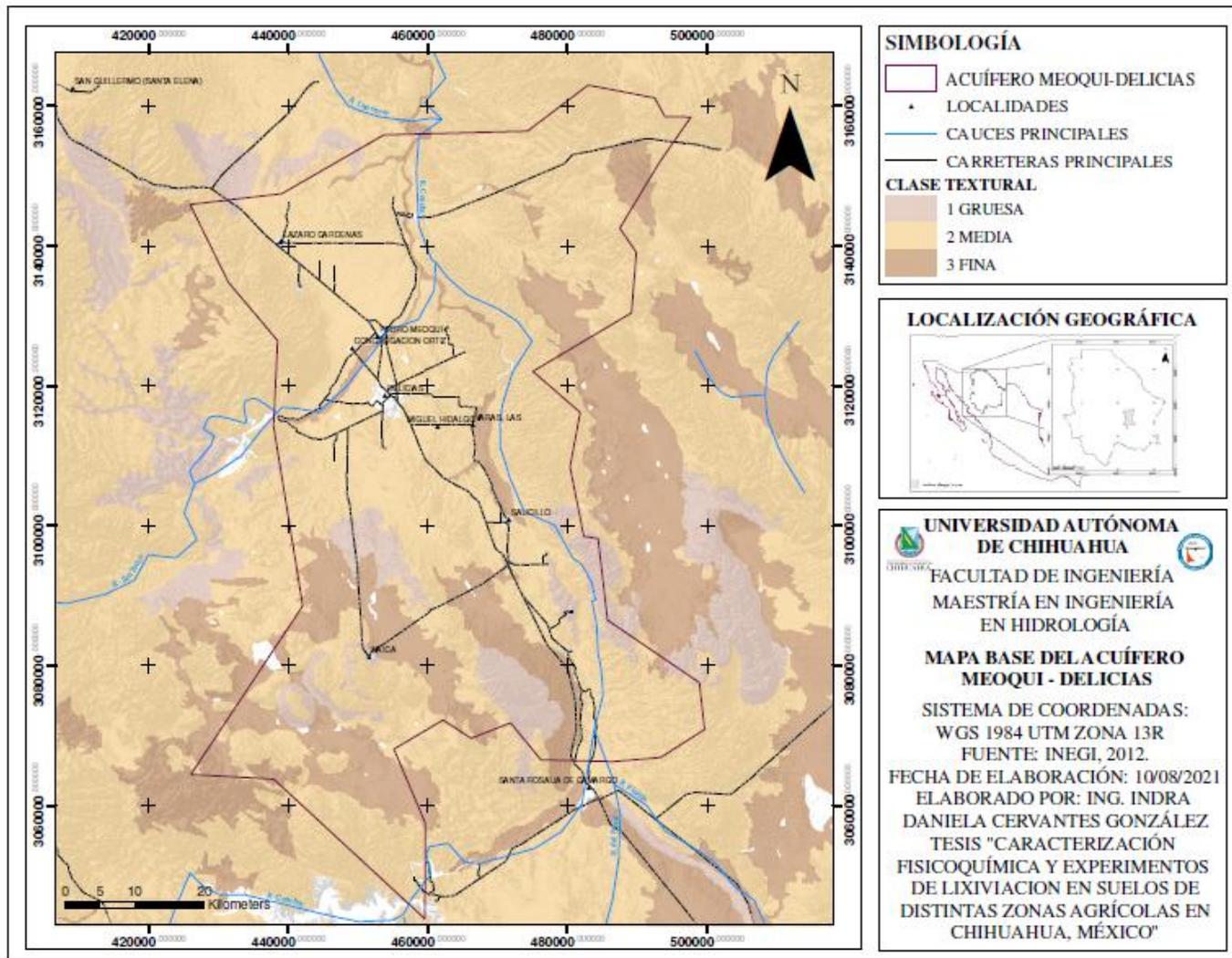


Figura 19. Clase textural del suelo del acuífero Meoqui – Delicias.

En la zona de estudio existen afloramientos de rocas sedimentarias marinas y continentales, conformando una columna estratigráfica que abarca desde el Paleozoico hasta el reciente. El basamento del área se conforma de rocas metamórficas, constituidas por metagranito, anfibolitas y gneis (SGM, 2000). Además, se encuentran afloramientos de rocas sedimentarias, cerca de Naica predominan las rocas calcáreas con intercalaciones de horizontes de arcillas. Se presentan formaciones como la formación Aurora, la cual consiste en una secuencia de calizas arrecifales con nódulos de pedernal (Burrows, 1909), la formación Del Rio, se encuentra sobreyaciendo a la caliza antes descrita, ésta a diferencia, se encuentra en estratos de lutitas calcáreas, fracturadas y falladas con espesores de 30m (Aranda, 1980), atribuye esta formación al Albiano superior y medio, de acuerdo a los fósiles contenidos en la roca, y la formación Buda consta de dos grupos, el inferior, con espesor de aproximadamente 30 metros, que consiste en calizas micríticas con fragmentos de rudistas, radiolarios, ostrácodos y equinodermos, y el miembro superior que se constituye de calizas con alto contenido de pelecípodos, este estrato alcanza espesores mayores a los 100 metros (Aranda, 1980). En el resto del área se tiene presencia de areniscas, dolomías, limolitas, lutitas y calizas de distintas formaciones como la Fm. Horquilla, Fm. Rara, Fm. Verde y la Fm. Plomosas, la cual además presenta conglomerados en su secuencia, todas ellas del carbonífero al Pérmico tardío. Posteriormente se depositaron materiales de las formaciones La Casita, Navarrete, Las Vigas, La Virgen y La Peña (SGM, 2000).

Por otra parte, se tienen rocas ígneas intrusivas, así como derrames volcánicos hacia la sierra del Monarca, principalmente riolitas y tobas riolíticas. Además, dentro del distrito de Naica se tiene presencia de rocas metamórficas, siendo mármol y skarn los afloramientos visibles, este último se compone principalmente de wollastonita, granate y vesuvianita (Aranda, 1980). Stone (1958), describe los tipos de roca encajonante enfocándose en el mármol y la intensidad del metamorfismo, la composición original y el efecto de la temperatura sobre él.

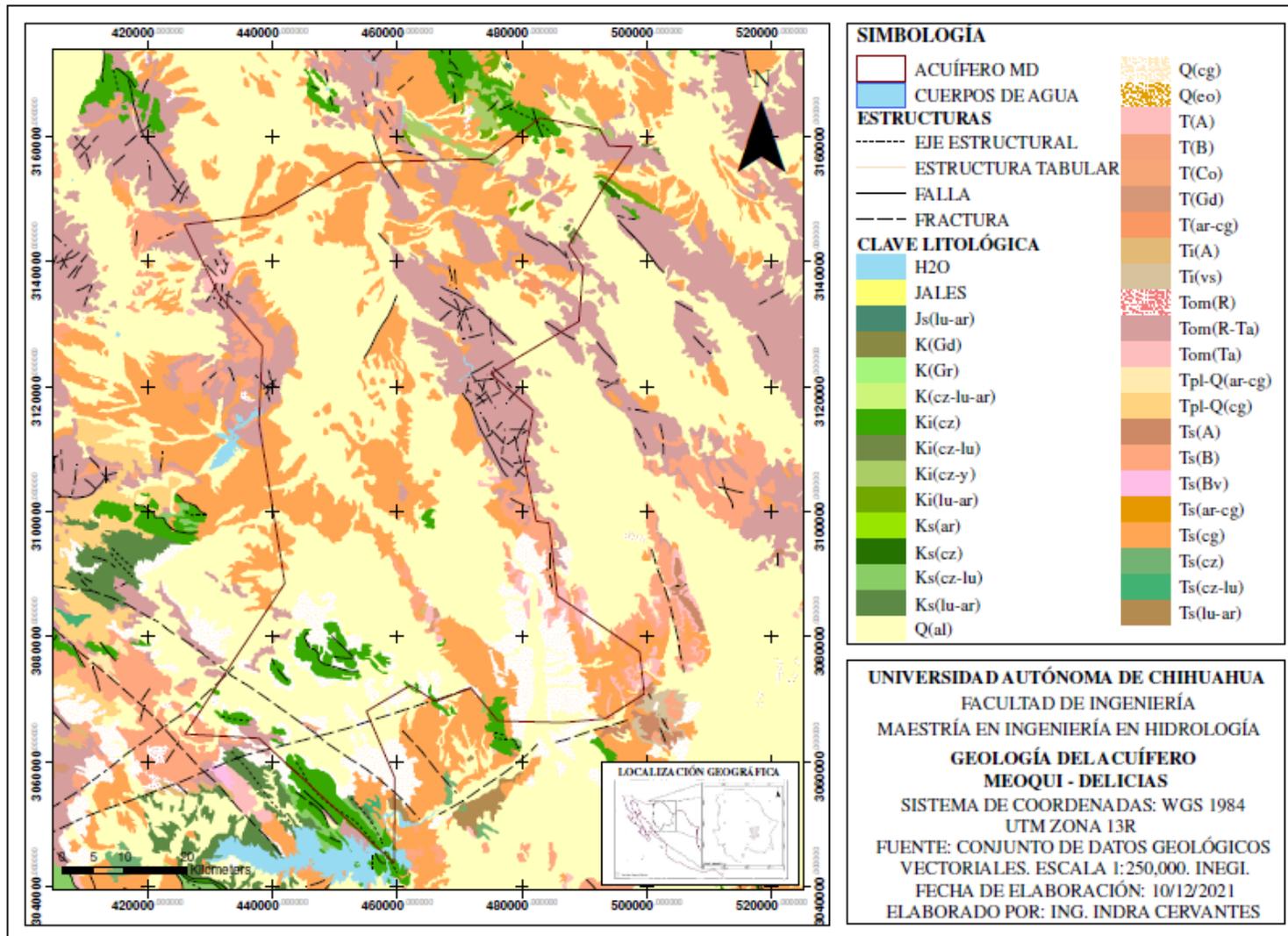


Figura 20. Geología del acuífero Meoqui – Delicias.

La mineralización dentro de los límites del acuífero se presenta principalmente en forma de vetas hidrotermales emplazadas en calizas cretácicas y asociadas a pórfidos riolíticos subvolcánicos (SGM, 2000).

2.3.6 Hidrogeología

El acuífero encuentra sus límites en las rocas volcánicas, que son de mínima permeabilidad, las cuales interrumpen el flujo transversal del agua (CNA, 1996). El acuífero del valle se considera de tipo libre, según la información piezométrica del área de estudio, esto se cumple a excepción de algunas zonas de semiconfinamientos locales, en zonas donde a poca profundidad se presentan cuerpos arcillosos, como en la zona noroeste, en Meoqui (CNA, 1996). Tales confinamientos encuentran salida en los múltiples pozos, la mayoría de los cuales son destinados al riego de parcelas.

La recarga más importante al acuífero se genera por la infiltración de excedentes del riego superficial a nivel parcela, así como a través de los canales de conducción y distribución que se encuentran sin revestir. La recarga por lluvia es escasa ya que la precipitación pluvial es baja, típica de las áridas regiones norteñas del estado de Chihuahua, y las aportaciones por flujo subterráneo provenientes del sur son despreciables (Barrera, 2008).

Se cuenta con derrames de basaltos que se localizan en la porción sur, éstos se encuentran fracturados por lo que funcionan como transmisor del agua infiltrada, con la información recabada se puede inferir que a profundidad esté comunicada con otros acuíferos a través de fallas, a pesar de que superficialmente no se aprecia dicha comunicación (CONAGUA, 2005). La parte superficial del acuífero es dominada por un medio poroso granular constituido por depósitos sedimentarios continentales, no consolidados, que tienen su origen principalmente, en medios ambientes de tipo fluvial y lacustre (CNA, 1996) éstos se encuentran depositados en una fosa de roca calcárea (Martínez, 2001). El modelo conceptual del acuífero considera que se tienen espesores que van de 400.0 m en el sur del valle (Saucillo), a 250.0 en el norte (Julimes) y 150.0 m en la porción central (Royo *et al.*, 2008). De acuerdo con la variabilidad de la conductividad hidráulica del acuífero y la

variabilidad de los tipos de sedimentos que rellenan la cuenca, el conjunto se caracteriza como un medio heterogéneo y anisotrópico (CNA, 1996; Martínez, 2001; Royo *et al.*, 2008).

2.3.7 Hidrogeoquímica

En el acuífero se tienen familias de agua bicarbonatada sódica y bicarbonatadas cálcicas ubicadas en la parte norte del acuífero, en la parte centro-oriental pertenecen a la familia sulfatadas sódicas, otra parte de las muestras sulfatadas y bicarbonatadas sódicas se localizan aguas abajo de la presa Francisco I. Madero, en la parte central-poniente y sur del acuífero, donde la geología superficial es en su mayoría depósitos aluviales y conglomerado, con algunas tobas riolíticas (Bencomo, 2013).

Como parte de los elementos con concentraciones por encima de la NOM 127-SSA1-1994, los valores de As registrados (Royo *et al.*, 2008), se han incrementado al norte del acuífero. En 1997 las concentraciones variaban entre 0.561 y 0.0016 con una media de 0.0594 mg/l, y en 2006 variaban entre 0 y 0.376, con una media de 0.056 mg/l (Bencomo, 2013). Según Bencomo (2013) esto debido a la profundidad de las perforaciones en las zonas afectadas, y a las fallas que permiten el ingreso de aguas termales al acuífero, facilitando la alteración de las rocas ígneas de composición félsica, provocando la puesta en movilidad del As y F.

El límite permisible de flúor en agua potable según la Norma Oficial Mexicana (Modificación NOM-127, 2000) es de 1.5 mg/l. El F tiene un comportamiento similar al del As, siendo la zona norte del acuífero la que presenta altas concentraciones; le sigue la zona centro, mientras que la zona sur es la menos afectada. En Bencomo (2013), hay valores por encima de la norma en 44% de las muestras. En 1996, se presenta un rango de 0.9 hasta 13.3 mg/l, con una media de 3.15 mg/l, en 2001, la concentración de flúor varió de 1.06 a 16.29 mg/l, con un promedio de 4.86 mg/l.

Hay altas concentraciones de sodio en las zonas norte y centro del acuífero, varían desde 30.8 hasta 412.6 con un promedio de 173.1mg/l. Los altos valores de nitratos se encuentran entre los ríos Conchos y San Pedro (Bencomo, 2013), áreas netamente agrícolas, el cual puede ser su origen.

2.4 El Sauz-Encinillas

2.4.1 Localización y vías de acceso

El acuífero El Sauz Encinillas se encuentra ubicado en la porción central del estado (Figura 34), el Valle de la Laguna de Encinillas, aproximadamente a 92 km al norte de la Ciudad de Chihuahua. La vía de acceso principal es la carretera Federal No. 45 partiendo de Chihuahua con dirección hacia Cd. Juárez (Figura 21).

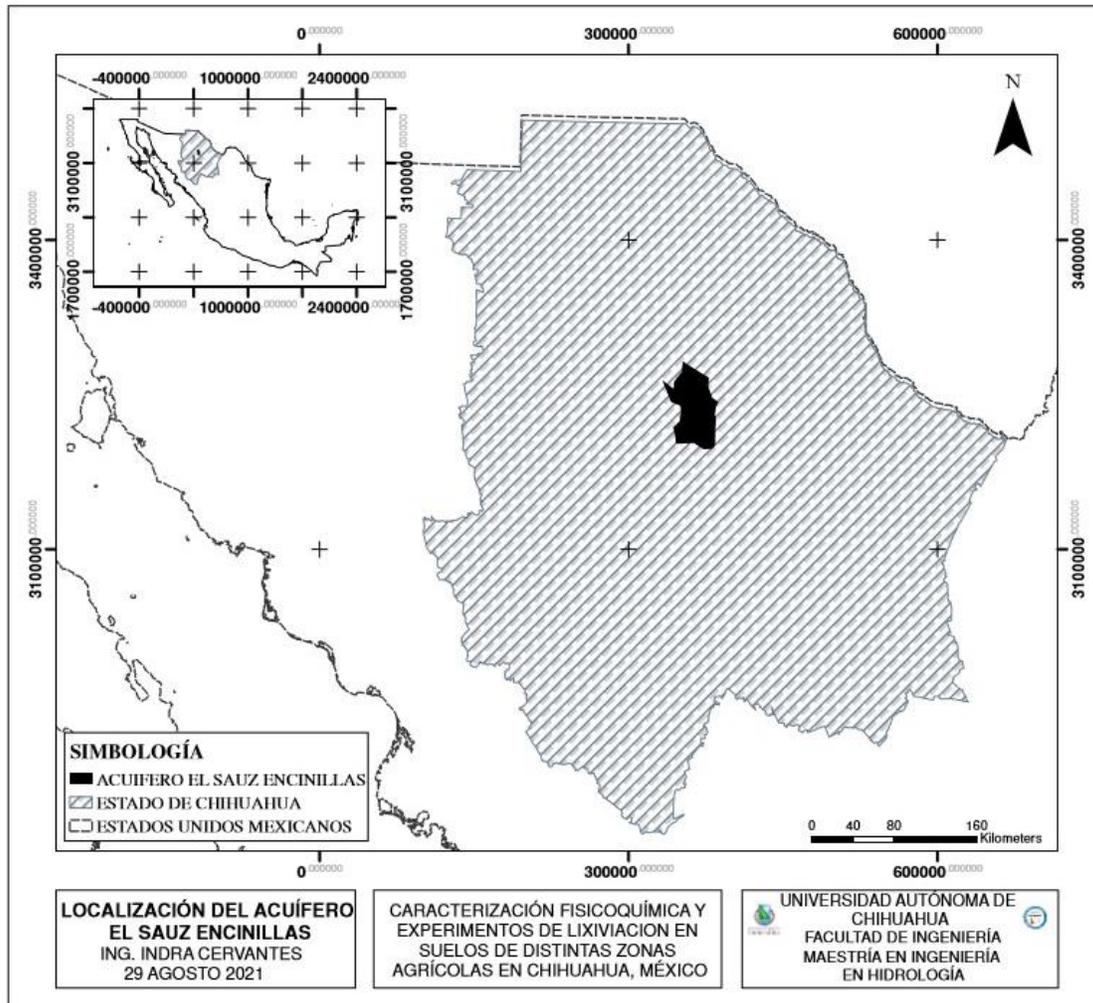


Figura 21. Localización geográfica del acuífero El Sauz Encinillas.

La Laguna de Encinillas (u Ojo Laguna) es una cuenca cerrada (o endorreica), se considera una laguna estacional, ya que solo en ciertas temporadas tiene agua (Benavides *et al.*, 2008), es alimentada por pequeñas corrientes provenientes de las zonas serranas que la rodean, entre las que destacan los

arroyos denominados el Sauz, los Prietos, las Playas, la Campana, la Primavera, el Niño, la Bernarda de los Sauces, entre otros (Benavides *et al.*, 2008).

2.4.2 Clima

En el área de estudio los climas son variables debido a distintos factores como lo son las precipitaciones, vientos, temperatura, humedad, entre otros, aun así, predominan climas secos y áridos con inviernos fríos (Figura 22).

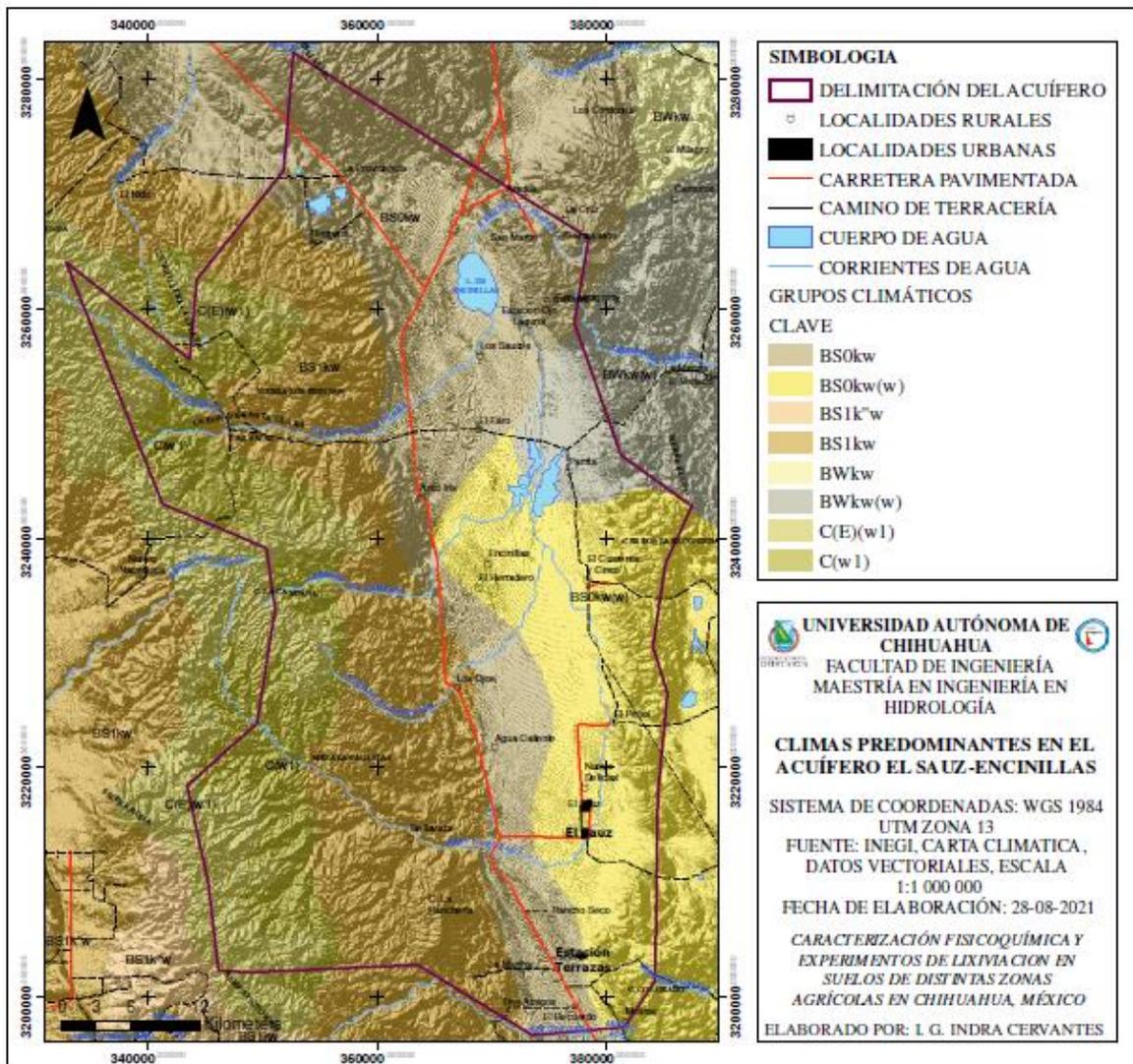


Figura 22. Climas predominantes en el acuífero El Sauz Encinillas.

De acuerdo con la clasificación de Köppen, adaptada por Enriqueta García (García, 1964) para México, en el clima de la zona dominan los climas secos a semisecos templados, dominando los grupos BSokw y BS1kw los cuales se describen en la Tabla A17 del Anexo A.

La precipitación media anual es de 380.95 mm por año, obteniendo un dato máximo de 643.33 mm y un valor mínimo de 238.11 mm, la temperatura media anual calculada es de 15.49°C, presenta una variación con tendencia parabólica, que se manifiesta con mayor intensidad durante los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre, decreciendo durante el resto del año (CONAGUA, 2020b). Los valores menores registrados corresponden a los meses de diciembre, enero y febrero. En cuanto a la evaporación potencial, su valor es del orden de 1,675 mm/año (CONAGUA, 2010).

2.4.3 Uso de Suelo y cubierta Vegetal

En el área de estudio predominan las zonas con pastizales naturales (PN) abarcando más de un 38% del área total, está localizado en la parte central del acuífero atravesando de norte a sur, además, se tiene pastizal halófilo (PH), característico de las áreas con suelos que presentan altos contenidos de sales solubles, normalmente relacionadas con zonas bajas de las cuencas cerradas donde existe variación en niveles de agua. En la Figura 23 se observa la distribución de los diversos grupos que abarca el área de estudio, para ampliar la información, revisar la Tabla B21 del Anexo B.

En los últimos años se ha incrementado el área destinada al uso agrícola, para esta versión de la carta edafológica, la cobertura agrícola, pecuaria y forestal abarcaba tan solo el 8.24% del área total.

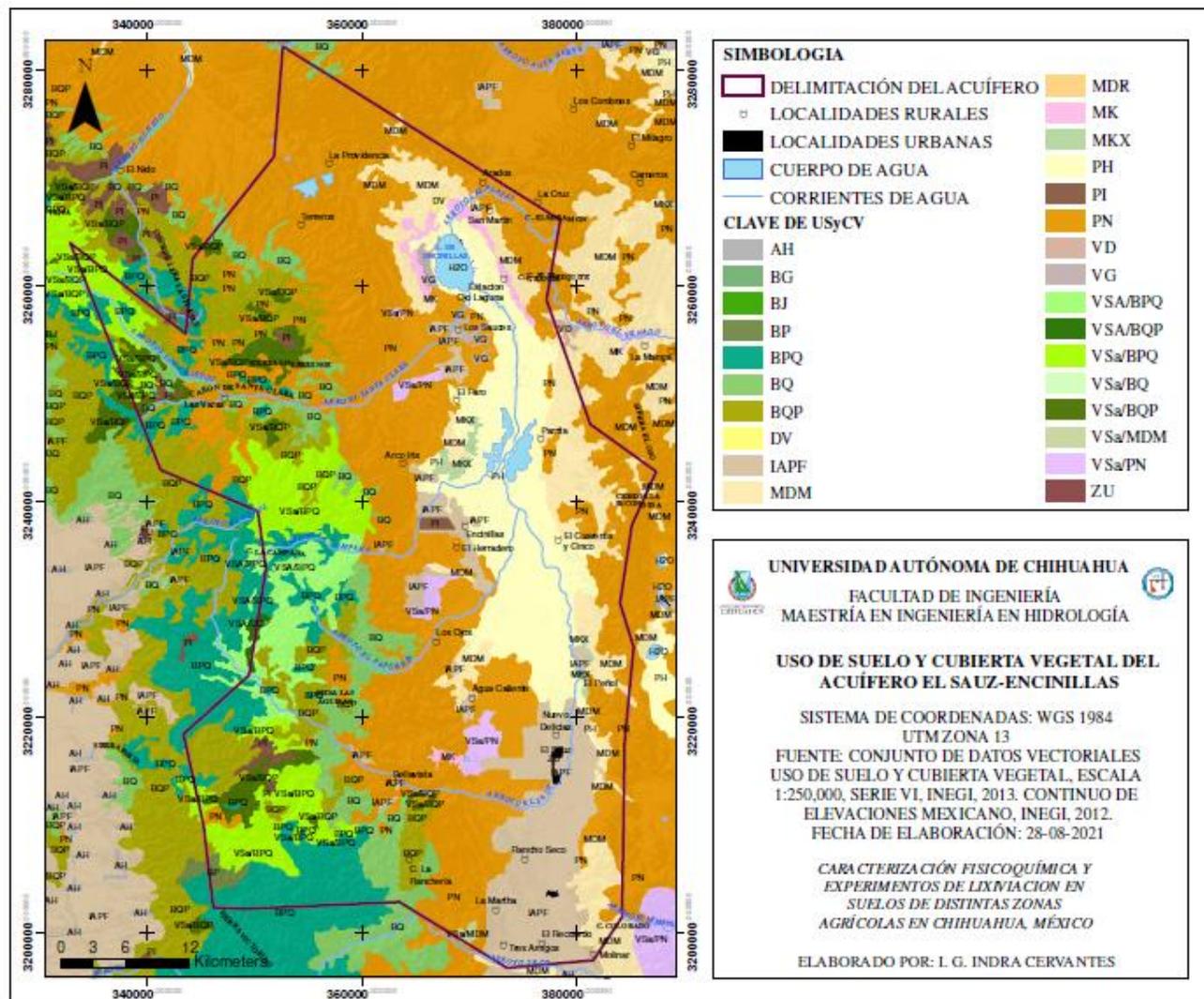


Figura 23. Uso de suelo y cubierta vegetal del acuífero El Sauz Encinillas

2.4.4 Edafología

En el área superficial del acuífero se presenta, con más de la tercera parte de cobertura, el tipo de suelo Paheozem (Figura 24), el cual es uno de los suelos más abundante en el país, se caracteriza por tener una coloración oscura, rica en materia orgánica y de espesores variables. En menor medida se tienen suelos Leptosoles, son suelos someros y extremadamente gravillosos, y Solonetz, los cuales presentan un subsuelo arcilloso, este suelo está presente principalmente en áreas de ganadería y zonas de desarrollo de pastizales. En la Tabla C25 del Anexo C se indican los porcentajes y áreas cubiertas por cada tipo de suelo.

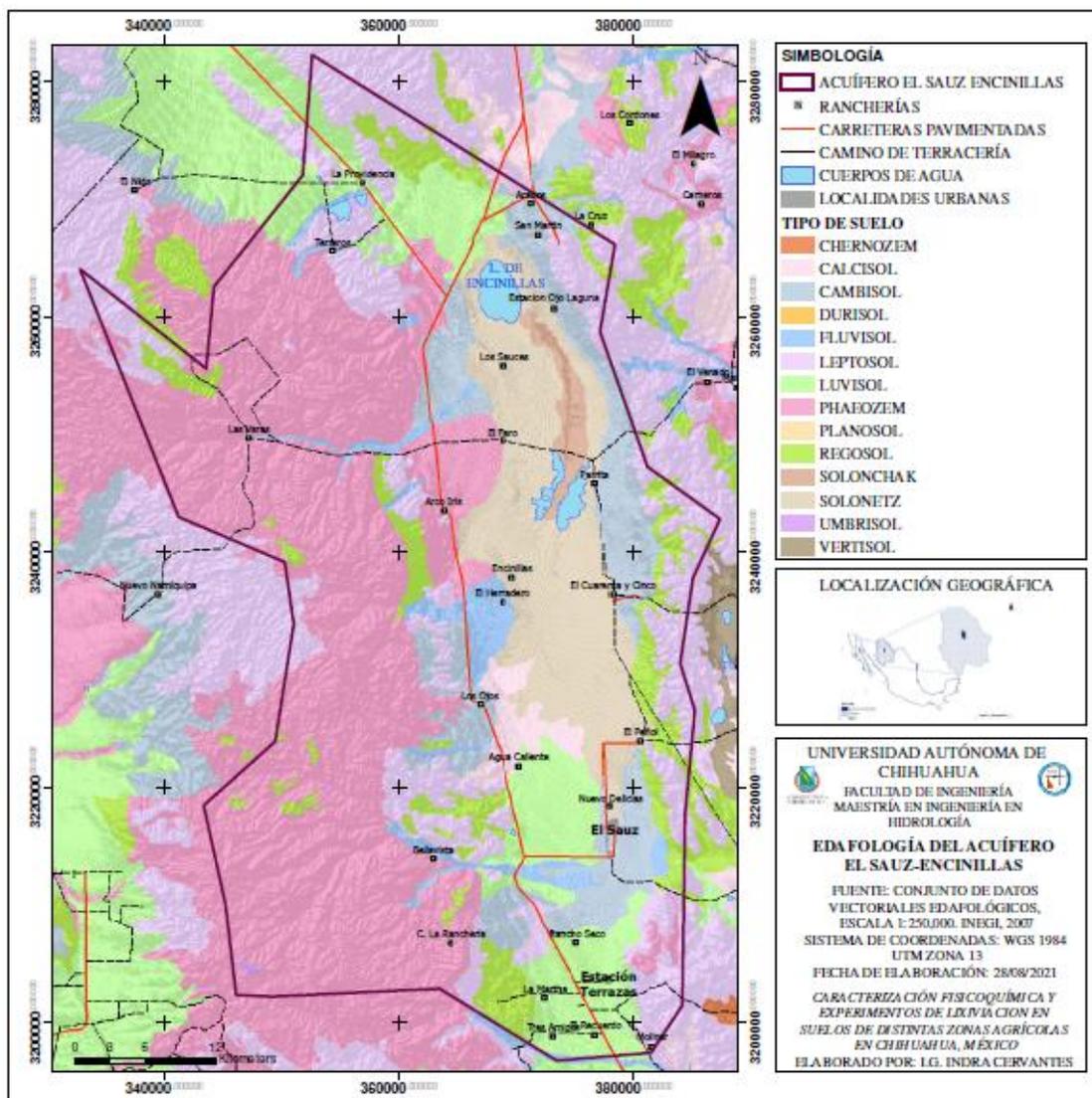


Figura 24. Edafología en el acuífero El Sauz Encinillas.

La textura del suelo está dada por su capacidad de retención de agua y nutrientes. En esta clasificación existen tres tipos (Figura 25):

- *Gruesa (1)*. Localizado en los pies de montes de la zona de estudio;
- *Media (2)*. Dentro del área esta textura domina la zona este y sur.
- *Fina (3)*. Suelos arcillosos con más de 35% de arcilla, que tienen mal drenaje, escasa porosidad, son por lo general duros al secarse, se inundan fácilmente y son menos favorables al laboreo. Este tipo de suelo se encuentra localizado en la zona de la laguna principalmente y en la zona oeste.

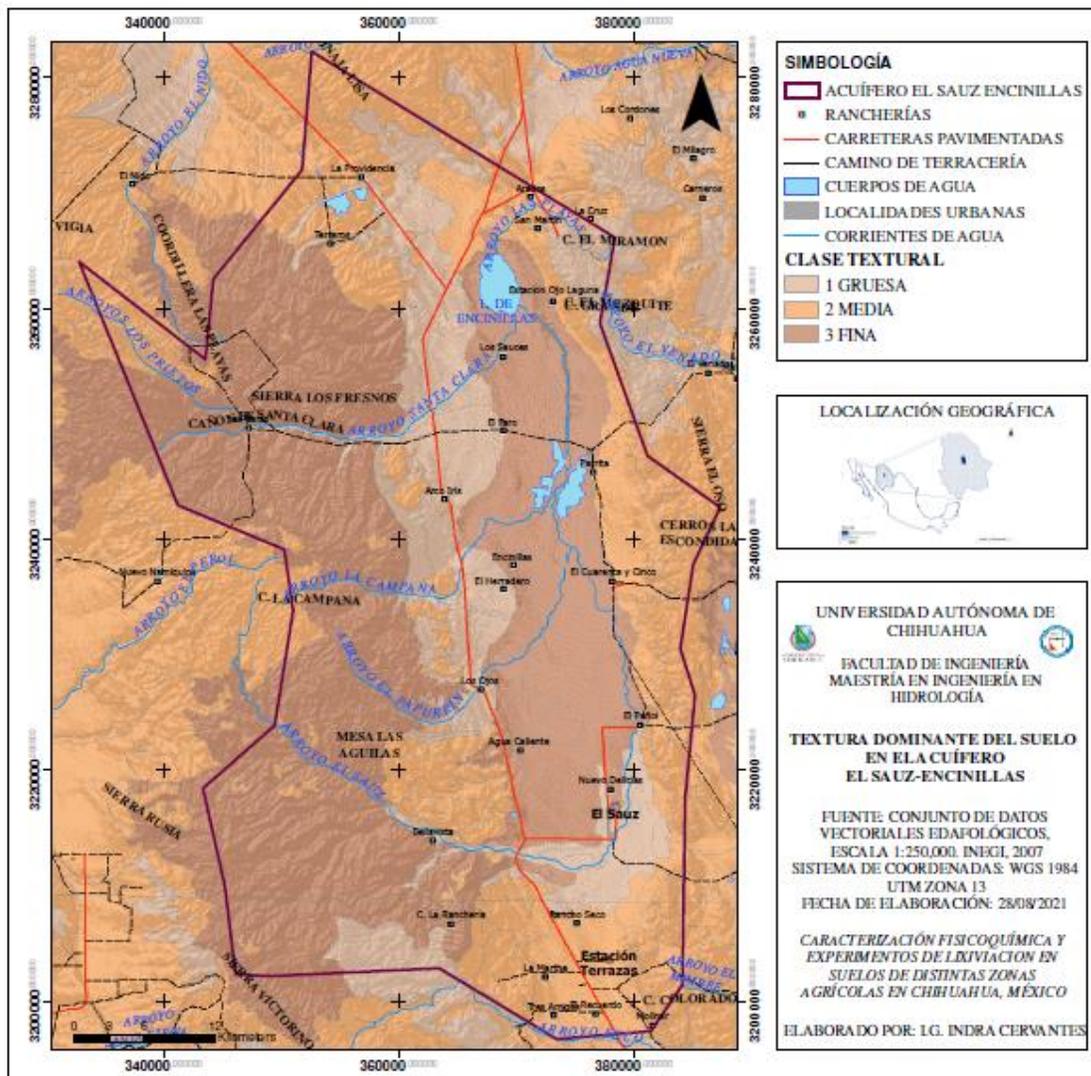


Figura 25. Tipo de textura en suelo del acuífero El Sauz Encinillas.

2.4.5 Geología

Durante el Precámbrico, el Cratón de Norteamérica sufrió eventos que deformaron parte del territorio (eventos ocurridos hace aproximadamente 1,024 y 1,037 millones de años), y en zonas cercanas al área de estudio queda evidenciado en los afloramientos de rocas metamórficas pertenecientes al basamento, clasificadas como metagranitos que a su vez son afectados por diques de anfibolitas precámbricas (Villalobos, 2004).

En el Mesozoico se inicia la colisión de las placas de Norteamérica y Sudamérica, así como la apertura del Golfo de México y la separación en Laurasia y Gondwana de Pangea. Esta separación afecta la zona de Chihuahua durante el Jurásico tardío – Cretácico temprano, desarrollando la cuenca de Chihuahua; en el Cretácico inferior el estado estuvo cubierto por mar y las placas de Norteamérica y Sudamérica se separaron totalmente (Reyes, 1992).

A finales del Mesozoico e inicios del Cenozoico, a causa de la subducción de la placa Farallón se genera la Sierra Madre Occidental, que a su vez ocasiona una compresión hacia el Noreste con la placa norteamericana produciendo la Orogenia Larámide (Haenggi, 2007). Las rocas sedimentarias cretácicas se encuentran afectadas por los esfuerzos compresivos de este evento, que plegó y ocasionó fallas inversas en el área (Haenggi, 2007).

Posteriormente se presentó un evento distensivo durante el Oligoceno-Mioceno, que causó un basculamiento en las unidades volcánicas y produjo fallas normales con amplia extensión y distribuidas en toda la región, lo que generó la formación de grabens, por lo que posteriormente se asignó el nombre a la provincia fisiográfica Sierras y Cuencas (Comisión Nacional del Agua, 2009).

Por último, se debe considerar el evento tectónico que está afectando la zona de estudio y actualmente se encuentra activo, correspondiente a la formación del Rift del Río Grande y que ha provocado vulcanismo máfico asociado a fallamiento normal (Comisión Nacional del Agua, 2009).

Al considerar de una manera regional las estructuras observadas en el acuífero, destaca el efecto importante que tuvieron los eventos tectónicos ocurridos a fines del Cretácico y principios del Paleógeno, cuando tuvo lugar el esfuerzo

máximo compresivo laramídico que levanta y pliega toda la secuencia sedimentaria preexistente, provocando cabalgamientos y fallamientos de tipo inverso. Al término de los esfuerzos compresionales, durante el Oligoceno-Mioceno, ocurrió un evento de distensión tectónica importante, que causó un basculamiento notable de la sección volcánica por medio de un sistema de fallas normales (Figura 26), de amplia distribución y extensión, que dio lugar a la formación de fosas y pilares tectónicos que constituyen las estructuras dominantes en el acuífero.

Los rasgos estructurales dominantes en el acuífero son aquellos que fueron ocasionados principalmente por la formación de la provincia de Sierras y Cuencas, de acuerdo con el evento de distensión tectónica del Oligoceno-Mioceno. De esta manera, se observan rasgos geomórfico-estructurales de rumbo NNO-SSE, que se expresan como fallas normales y fracturas a partir de las cuales se generó un vulcanismo fisural importante. Destacan sobre el valle de relleno aluvial los bloques tectónicos levantados que forman las sierras Majalca-El Nido-Paporín y Peña Blanca principalmente (CONAGUA, 2010).

El último evento tectónico que afectó al área del acuífero y persiste actualmente, corresponde a la formación del “*Rift del Río Grande*”, provocando un vulcanismo de composición basáltica, asociado a fallamiento normal (Carta Geológica-Minera Buenaventura H13-7, CRM 1991. Escala: 1:250,000).

Según la Comisión Nacional del Agua (2009), en la sierra Majalca-El Nido-Paporín aflora una potente sección de rocas volcánicas terciarias, compuestas por tobas, domos y flujos ignimbríticos riolíticos con textura variable, debido a los diferentes grados de soldamiento de las unidades. En el cerro La Campana se pueden observar más de 1000 m de espesor de esta sección volcánica. Entre el cañón de Santa Clara y el cañón de Bellavista, están expuestas rocas basálticas del Paleógeno-Neógeno que se encuentran hacia la porción superior de la secuencia volcánica, sin embargo, rocas andesíticas eocénicas aforan en la parte baja de la sección; esto es, casi al norte de la salida del cañón de Santa Clara (CONAGUA, 2010).

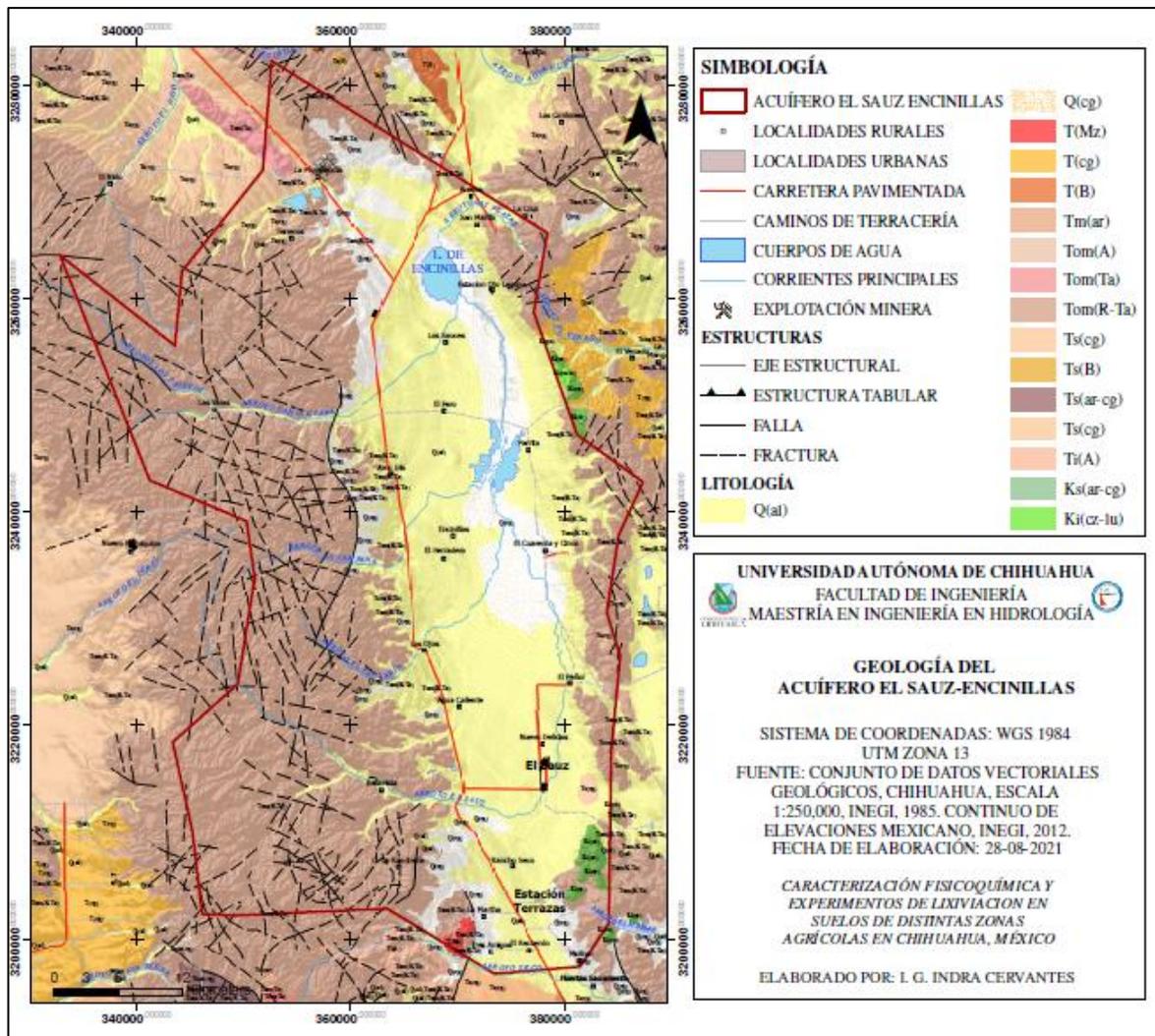


Figura 26. Geología en el acuífero El Sauz Encinillas.

En lo que se refiere al límite oriental del valle, la sierra Peña Blanca presenta una secuencia volcánica similar; pero ligeramente variable en algunos aspectos, tanto en litología como en edad y espesor. La secuencia volcánica descansa discordantemente sobre calizas cretácicas (CONAGUA, 2010).

En el acuífero, la secuencia calcárea marina del Cretácico inferior está compuesta principalmente por la formación Aurora con orientación casi N-S con estratos gruesos a masivos buzando al oeste, salvo en la porción norte donde buza hacia el sur, afectada localmente por el emplazamiento de cuerpos intrusivos graníticos y pórfidos riolíticos, presentando áreas de metamorfismo de contacto, evidenciados por la presencia de mármol y skarns (CONAGUA, 2010).

2.4.6 Hidrogeología

El acuífero de El Sauz Encinillas colinda al norte con los acuíferos Laguna de Tarabillas y Flores Magón-Villa Ahumada, al este con Laguna de Hormigas y Laguna El Diablo, al sur con Chihuahua Sacramento y Alto Río San Pedro y al oeste con Santa Clara y Cuauhtémoc, todos ellos pertenecientes al estado de Chihuahua (CONAGUA, 2010).

El Diario Oficial de la Federación (2015) menciona que el acuífero El Sauz-Encinillas es de tipo libre, heterogéneo y anisótropo, conformado por un medio granular y un medio fracturado. El medio granular es el que actualmente está en explotación, mientras que el medio fracturado constituye la zona de recarga y es parte del acuífero a profundidad, sin embargo, aún no ha sido explorado (Granillo, 2015). El medio granular está constituido por sedimentos aluviales no consolidados de granulometría fina a gruesa, así como conglomerados, que rellenan la fosa tectónica, cuyo máximo espesor alcanza los 800 metros y cuya permeabilidad varía de media a elevada. El medio fracturado está constituido por rocas volcánicas y calizas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento (CONAGUA, 2010).

El basamento, como se mencionó anteriormente, se compone de rocas volcánicas fracturadas, principalmente secuencias ignimbríticas de composición riolítica, relativamente compactas y andesitas. Este tipo de roca presenta normalmente baja permeabilidad, en este caso como se cuenta con cierto grado de fracturamiento, se comporta como zona de recarga en superficie, esto debido a que se encuentra este material en las sierras que limitan al valle. A mayor profundidad, las rocas calizas cretácicas conforman el basamento regional y presentan buena permeabilidad (CONAGUA, 2018 b).

2.4.7 Hidrogeoquímica

El flujo subterráneo es de sur a norte, hacia la Laguna de Encinillas, y de norte a sur, en la porción meridional de la zona (INEGI, 2003). La calidad del agua tiene valores de 150 a 1 375 ppm de Sólidos Totales Disueltos (STD), que indica que el agua es de dulce a tolerable; la familia de agua que predomina en el área

según CONAGUA (2010) y Zamarrón (2013), el agua es bicarbonatada cálcica-sódica, que representa agua de reciente infiltración que ha circulado a través de rocas volcánicas.

Se han encontrado altas concentraciones de flúor en dos pozos, esta contaminación es de tipo natural (INEGI, 2003). Zamarrón (2013), menciona que el contenido de Flúor aumentó principalmente en la parte central y norte del acuífero, en un periodo de 14 años (muestras tomadas de 1996, 2008 y en 2010), mientras que en la zona sur del acuífero El Sauz-Encinillas los niveles de fluoruros se mantienen y en algunos casos se nota la disminución de este anión. Muestras tomadas en 2008 y 2010, evidencian la presencia de Hierro (Fe^{+2}) en la parte norte del acuífero, el aumento en el contenido de este catión no ha sido significativo, pero en el parte sur ha aumentado hasta 0.6 mg/l aproximadamente en 2 años. Se encuentran concentraciones altas de nitratos en algunos aprovechamientos situados en la porción centro oriental del acuífero, el promedio de este elemento en el acuífero es de 7.4 mg/l con un máximo de 38.5 mg/l. Como ya se mencionó anteriormente, el Fe y As exceden la norma de agua potable en algunos pozos y sus concentraciones se incrementan de las estribaciones de las sierras hacia los extremos norte y nororiente del acuífero (CONAGUA, 2010; Zamarrón, 2013).

Capítulo 3. Marco Conceptual

3.1 Ciclo hidrológico

Describe el almacenamiento y movimiento del agua entre la Biósfera, Atmósfera, Litósfera e Hidrósfera. Este ciclo involucra un proceso de recirculación permanente. El agua en nuestra atmósfera se mueve desde un depósito (o reservorio) a otro (Figura 27), a través de los diferentes procesos, como: evaporación, condensación, precipitación, escorrentía, sublimación, transpiración, fusión, infiltración (o percolación) así como el flujo de agua subterránea.

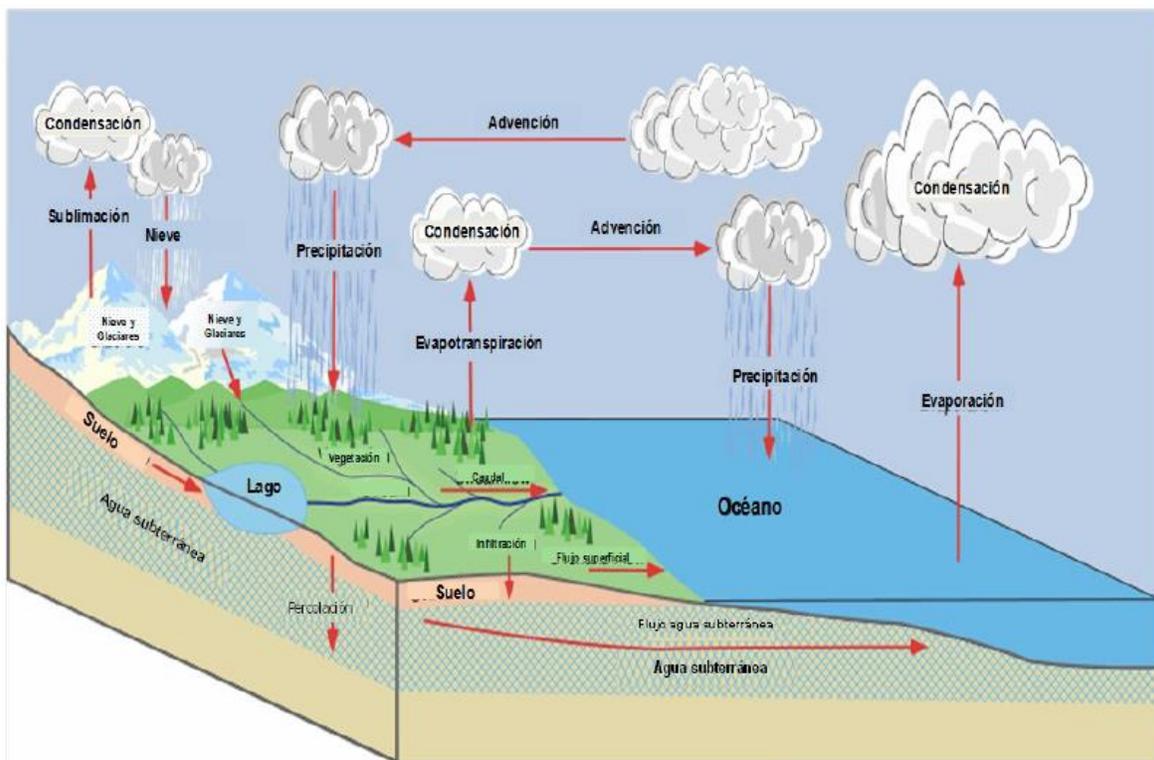


Figura 27. Esquema del ciclo hidrológico (adaptado por Ordoñez, 2011)

El proceso de infiltración es uno de los procesos más complejos del ciclo, ya que está determinado por un conjunto de factores como lo son el volumen de precipitación captado, la radiación solar, así como las características del suelo; granulometría del material, permeabilidad, conductividad, capilaridad, entre otros.

3.2 Proceso de lixiviación

La infiltración del agua a través del medio da paso a los procesos de lixiviación, Kurniawan *et al.* (2006) lo definen como un líquido muy contaminado que se genera cuando la lluvia que percola a través de los residuos sólidos se combina con la fracción orgánica degradada de los mismos. En otras palabras, la lixiviación de sustancias químicas se refiere al movimiento descendente y de forma vertical de estas por el perfil del suelo junto con el agua (Christoffoleti, 2005). Algunos autores describen que la lixiviación es una de las principales fuentes de contaminación por plaguicidas y fertilizantes en las aguas subterráneas (Chopra *et al.*, 2010; Costa *et al.*, 1994), esta contaminación puede aumentar o disminuir dependiendo de la profundidad del nivel freático y la movilidad del contaminante (Huertas, 2014). Dependerá en gran medida de las características de la sustancia o elemento químico en cuestión, ya que la evolución de los compuestos orgánicos e inorgánicos en la zona del suelo dependen de procesos físicos, químicos y microbiológicos (Montoya 2008), que están influenciados principalmente por la cinética de los procesos de adsorción-desorción; estos procesos implican la partición de los solutos reactivos entre la solución y la fase adsorbida (Candela *et al.*, 2003), sobre las tasas de adsorción, se puede decir de manera general que la movilidad dependerá de su afinidad por los constituyentes del suelo, en general cuanto mayor sea su adsorción en suelo menor será su potencial de lixiviación (Martínez, 2005); la degradación y volatilización de los elementos también son factores considerables, tanto como el tiempo de contacto con el agua y su pH (Huertas, 2014).

Ciertos elementos químicos pueden ser transportados y depositados en diferentes puntos del medio poroso, al entrar en contacto prolongado con el agua, se difunden al medio y lo agreden (Muro, *sf*). La movilización de estos elementos químicos en concentraciones mayores a las que naturalmente se encuentran en el ambiente, puede ser tóxica a algunas formas de vida (Siegel, 2002) o acumularse en tejidos orgánicos (López & Pérez, 2018). Muro (*sf*), describe que otras formas de contribuir a la lixiviación y agravar la respuesta tanto en el suelo como en el agua subterránea es mediante el empleo de fertilizantes con elevada acidez, el riego excesivo y cultivos que retienen muchos nutrientes del suelo.

3.3 Suelo

Los suelos juegan un papel importante en el proceso de infiltración y posteriormente de lixiviación. Brady & Weil (2002), definen al suelo como una entidad natural dinámica de la superficie de la tierra donde crecen las plantas, compuesto de minerales, materiales orgánicos y organismos vivos. Se sabe que el suelo es producto de la meteorización física, química y biológica de un material rocoso en un cierto periodo de tiempo, todo este proceso bajo condiciones climáticas y topográficas determinadas (Lindbo *et al.*, 2012; Porta *et al.*, 2010).

Por otra parte, el suelo es el factor principal que controla el flujo del agua en el ciclo hidrológico, así como de las especies químicas dentro de los ciclos biogeoquímicos (Álvarez, 2010), su composición puede o no ser similar al substrato geológico pero su presencia o ausencia generaría grandes variaciones en los ciclos mencionados anteriormente (FAO, 2015). Los suelos varían en cuanto a las características químicas, pero en general están dominados por la fracción mineral.

La presencia de concentraciones mayores a las habituales de algunos elementos químicos y compuestos en el suelo es un tipo especial de degradación que se denomina contaminación (Delgado *et al.*, 2014). Por su origen puede ser geogénico, es decir, pueden proceder de la propia roca madre en la que se formó el suelo, de la actividad volcánica o de mineralizaciones o antropogénico, por el contrario, los antropogénicos se producen por los residuos peligrosos derivados de actividades industriales, agrícolas, mineras y de los residuos sólidos urbanos (Huertos y Romero, 2008).

La capacidad de auto regeneración del suelo se ve afectada cuando se acumulan en el mismo sustancias contaminantes, además de poner en peligro recursos tales como el agua potable (Delgado *et al.*, 2014).

3.3.1 Composición química de los suelos

El 45% del suelo es el componente mineral, el 5 % la fracción orgánica, un 25% lo constituye el aire y el otro 25% el agua alojada en los poros (FAO, 2015; Jordán, 2006). Dentro de la fracción mineral y orgánica, se encuentran los nutrientes y elementos que puede almacenar el suelo, como el Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ y

pequeñas cantidades de Fe^{2+} , Mn^{2+} y Al^{3+} , además de los cationes mencionados, se encuentran algunos aniones como HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} y Cl^- (Álvarez, 2010).

Además de los iones de mayor concentración, se pueden encontrar a los elementos traza, los cuales están presentes en relativamente bajas concentraciones ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en la corteza terrestre, suelos y plantas. Los elementos trazas son esenciales para el desarrollo de los seres vivos, pero pueden ser tóxicos si se sobrepasan ciertos umbrales tolerables por los organismos. De forma general, los elementos trazas son tóxicos si se ingieren o inhalan en cantidades suficientemente altas y durante largos períodos de tiempo (Seoanez, 2003). Álvarez (2010), menciona que estos se pueden encontrar bajo diferentes formas químicas, puede ser como especies solubles fácilmente disponibles, pueden encontrarse débil o fuertemente unidas a las partículas sólidas o bien, pueden encontrarse como especies precipitadas por lo que son insolubles y no disponibles para las plantas.

La capacidad de los suelos para adsorber o soltar elementos traza de las soluciones acuosas es de especial interés para la agricultura, ya que permite elevar la fertilidad del suelo y juegan un papel primordial en el desarrollo vegetal, también permite generar soluciones en cuanto a temas ambientales, como la remediación y descontaminación de suelos (Álvarez, 2010).

Ciertos parámetros edafológicos y la forma de reacción con los componentes del suelo determinan la disponibilidad de los elementos traza, por ejemplo, las fases activas del suelo, entre las que podrían mencionarse las arcillas y los óxidos de hierro y manganeso y las reacciones fisicoquímicas (Álvarez, 2010).

Como ya se mencionó previamente, en el suelo ocurren diversos procesos y reacciones, y soporta un continuo intercambio de materia y energía con la atmósfera, hidrosfera y biosfera (Álvarez, 2010) pues es un sistema abierto, en él se encuentran principalmente metales pesados, estos se definen como aquellos que presentan una densidad mayor de 5 a 6 g/cm^3 (Wild, 1993), dentro de la literatura se consideran al As y Se, por aspectos de investigación, pero se debe tener claro que son metaloides y no metales (Connell, 1997; Brady & Weil, 2002). Cabe mencionar que en Chihuahua se han realizado estudios relacionados con la presencia de arsénico en rocas y sedimentos (Granillo, 2015; Cervantes, 2018).

Los metales son micronutrientes indispensables para los sistemas biológicos, tales como el Ca, Cu, Fe, Mg, Ni y Zn. Por otro lado, algunos metales como el Co, Hg, Pb y V tienen diversos efectos y son elementos que pueden incrementar la lista de compuestos carcinógenos (Hartwig 1995; Bal y Kasprzak 2002; IARC 2006).

De los elementos traza que se pueden encontrar en suelos, hay 17 que se consideran como muy tóxicos, y lamentablemente se encuentran disponibles en muchos suelos en concentraciones que sobrepasan los niveles de toxicidad. Estos son: plata (Ag), arsénico (As), bismuto (Bi), cadmio (Cd), cobalto (Co), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), paladio (Pd), platino (Pt), antimonio (Sb), selenio (Se), estaño (Sn), telurio (Te), titanio (Ti) y zinc (Zn), de ellos, 10 son fácilmente movilizados por la actividad humana en proporciones que exceden en gran medida la de los procesos geológicos (Ag, As, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Sn y Ti) (Novotny, 1995).

Por otra parte, la en la clasificación de la EPA (Agencia de Protección Ambiental, por sus siglas en inglés) se incluyen en la lista de contaminantes prioritarios los siguientes 13 elementos traza: Sb, As, Be, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Tl y Zn (Huertos y Romero, 2008).

Es conocido que cuando el agua se infiltra en los suelos da paso a la disolución de ciertos compuestos y elementos, ejemplo de esto puede ser el flúor, arsénico, fierro y vanadio por mencionar algunos.

Capítulo 4. Metodología

4.1 Investigación bibliográfica y revisión de trabajos previos

Para la investigación de estudios previos, se llevó a cabo la búsqueda y recolección de información bibliográfica referente a las investigaciones realizadas en el país y en el extranjero, relacionadas con las características de los suelos, experimentos de lixiviación, columnas de suelo, relación entre el medio superficial y el subterráneo, relación de cultivos, iones mayoritarios y elementos menores, además, estudios generales de gobierno para complementar información del marco físico, así como información de calidad de agua e hidrogeoquímica de cada acuífero y zona de interés.

4.2 Trabajo de campo

Una vez recolectada la información, se analizaron las zonas con calidades de agua subterránea que no cumplían con la NOM-127-SSA1-1994 donde se tiene registro de altas concentraciones de algunos elementos (los más documentados son As, F⁻ y NO₃⁻) dentro de zonas agrícolas, este análisis se llevó a cabo a través de sistemas de información geográfica.

Posterior a la selección de los sitios de interés, se realizó un reconocimiento en campo, y se seleccionaron los sitios para la toma de muestras de acuerdo con los permisos concedidos y la facilidad de acceso a las áreas. Además, la selección de los puntos de muestreo se llevó a cabo intentando distribuirlos espacialmente dentro de las áreas de interés.

Las muestras de suelo se tomaron a nivel superficial (profundidad aproximada de 30 a 70 centímetros) dentro de las tierras de cultivo (Figura 28) la mayoría de ellas entre los surcos de las siembras en los 5 acuíferos estudiados.



Figura 28. Profundidad de muestreo

La recolección del material se realizó en botes con capacidad de 20 litros recubiertos con bolsas para mantener la humedad y evitar volcaduras de material a la hora del transporte (Figura 29).



Figura 29. Recolección del material

Para extraer el material se utilizó un pico para aflojar y remover el material, así como una pala para depositar el material en bolsas colocadas en los recipientes, se rotularon las bolsas con plumón indeleble indicando el día, la hora y las coordenadas de la toma de las muestras en el sitio de recolección (Figura 30) así como también se registró en la libreta de campo, esto con la finalidad de evitar confusiones a la hora de transportar todas las muestras al laboratorio.



Figura 30. Rotulado de bolsas.

La toma de muestras de suelo permitió extraer y analizar una parte representativa del mismo para clasificarlo y en laboratorio poder realizarle ciertos análisis y pruebas para conocer sus propiedades. Para hacer estas pruebas se recopilaron 15 muestras para el análisis general (Figura 31), además, se tomaron los resultados de 3 muestras de la tesis de Granillo, (2015) indicadas como M5 SE, M6 SE y M7 SE. En la Tabla 1, se muestran las coordenadas de las muestras tomadas, así como también las analizadas en la investigación de Granillo que servirán como punto de comparación.

Es importante mencionar que la muestra M00 se tomó en el municipio de Gómez Farías fuera de una zona agrícola, en un banco de arena (dunas del Porvenir del Campesino), ya que debido a su composición y granulometría funcionarán como muestra base (o blanco) para los resultados de lixiviación.

Tabla 1. Coordenadas de localización de las muestras de suelo.

Muestra	Coordenada Este	Coordenada Norte	Acuífero
M00	230513.25	3260804.49	Alta Babícora
M01	254027.6	3322262.17	Buenaventura
M02	243524.42	3327889.41	Buenaventura
M03	258926.45	3308948.78	Buenaventura
M04	334353.76	3158822.29	Cuauhtémoc
M04B	334347.1	3158798.12	Cuauhtémoc
M05	327897.94	3202607.29	Cuauhtémoc
M06	292032.35	3185575.84	Cuauhtémoc
M07	314388.31	3181501.55	Cuauhtémoc
M08	312723.77	3141095.69	Cuauhtémoc
M09	456189.45	3149477.75	Meoqui - Delicias
M10	468852.37	3099894.51	Meoqui - Delicias
M11	454190.87	3083333.82	Meoqui - Delicias
M12	483720.71	3071676.68	Meoqui - Delicias
M13	448999.83	3129275.68	Meoqui - Delicias
M5 SE	373241.00	3260615.00	Sauz - Encinillas
M6 SE	371398.00	3267158.00	Sauz - Encinillas
M7 SE	365768.00	3254341.00	Sauz - Encinillas

Nota: Las coordenadas están expresadas en el sistema WGS 1984 UTM Zona 13.

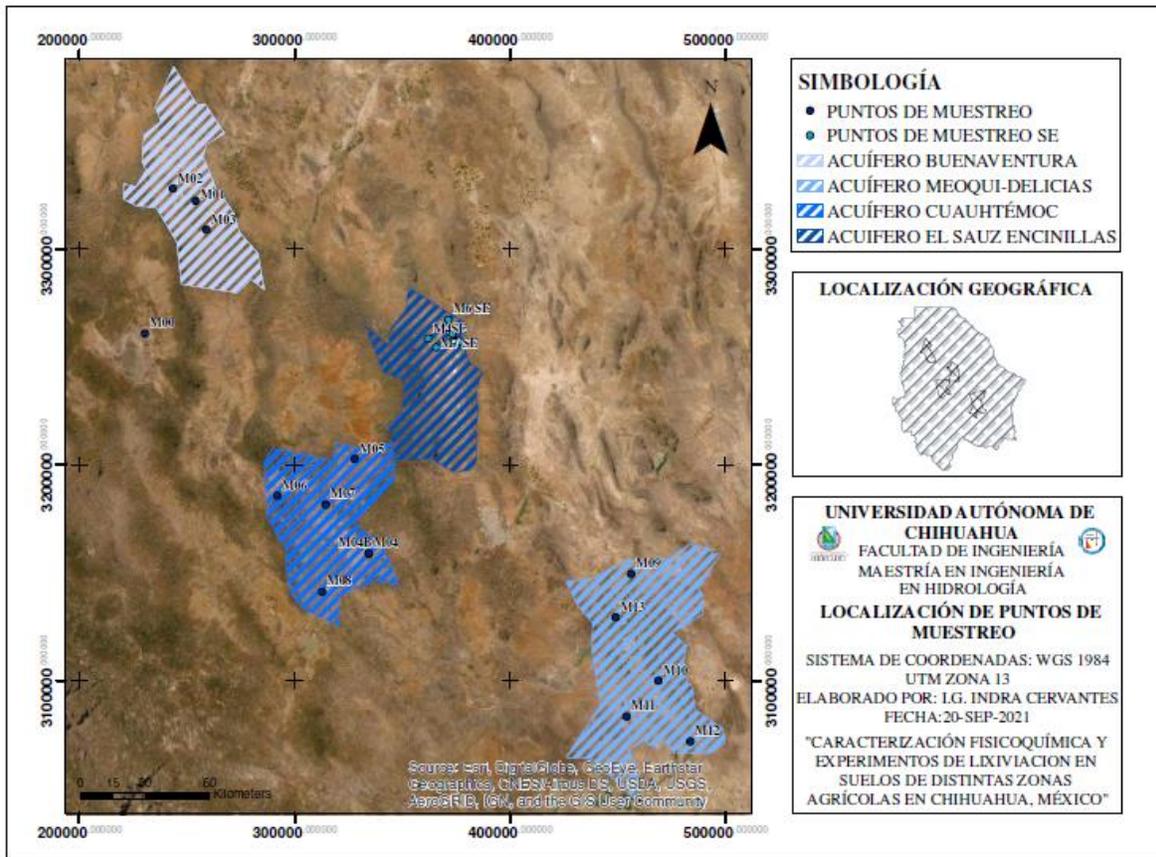


Figura 31. Localización de las muestras tomadas en esta tesis.

4.3 Trabajo de laboratorio

El trabajo de laboratorio se dividió en distintas etapas, en las cuales se estuvo trabajando en los laboratorios de Ingeniería Sanitaria, de Geología, de Materiales, Suelos y Asfaltos, todos en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua, así como en laboratorios externos (análisis químico en el Servicio Geológico Mexicano).

4.3.1 Análisis físico de las muestras

4.3.1.1 Caracterización sedimentológica de los suelos

La sedimentología se puede definir como el estudio del transporte y deposición de sedimentos (Leeder, 1999) y trata de estudiar la composición, estructuras internas y procesos hidrodinámicos de formación de sedimentos. Entre los parámetros tomados en cuenta para esta caracterización destacan el tamaño

del grano, grado de clasificación, redondez, esfericidad y la madurez textural y mineralógica.

○ *Tamaño de grano.* Una de las propiedades más importantes de los sedimentos que se puede determinar en campo es el tamaño de los granos. Esta propiedad permite inferir algunas características importantes como lo es la cantidad de transporte que han tenido las partículas, las condiciones energéticas del medio a las que han sido expuestas, la distancia de la fuente de origen (Adams *et al.*, 1997). Actualmente se utiliza para su identificación la escala granulométrica de Udden Wentworth (Tabla 2).

Tabla 2. Escala de tamaño de grano de Udden-Wentworth (Modificado de Adams *et. al.*, 1997).

CLASIFICACION DE SEDIMENTOS			
Límites de Clases (milímetros)	Clases de tamaño		Término para roca
256 16 4 2	G r a v a s	Peñascos	Conglomerado Brecha Rudita Rocas rudáceas
		Mataténas	
		Guijarros	
		Gránulos	
1 0.05 0.25 0.125 0.0625	A r e n a s	Arenas muy gruesas	Arenisca Arenita Rocas arenáceas
		Arenas gruesas	
		Arenas medianas	
		Arenas finas	
		Arenas muy finas	
0.0312 0.0156 0.0078 0.0039	L i m o s	Limo grueso	L i m o l i t a
		Limo medio	
		Limo fino	
		Limo muy fino	
		Arcilla	Lutita

○ *Clasificación.* Propiedad conocida también como grado de selección, describe la uniformidad o variación en tamaños de granos de una roca sedimentaria, o sedimento. Permite obtener información sobre la energía del medio y su capacidad

de selección de tamaños de las partículas transportadas y depositadas (Boggs, 1987).

Si un material muestra solo una clase granulométrica bien definida, el tamaño de todas las partículas es similar, se dice bien seleccionado (Figura 32), por otro lado, un material con una gran variedad de tamaños se denomina mal seleccionado (Adams *et al.*, 1997).

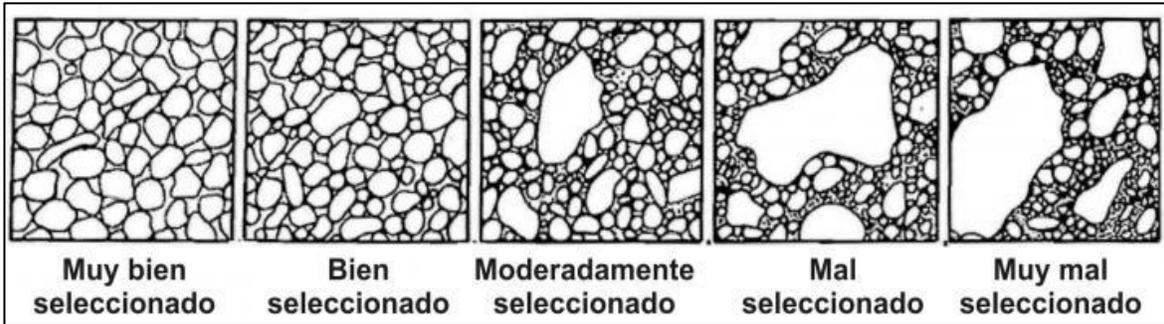


Figura 32. Grado de selección de los sedimentos (Pettijohn) (Universidad de Alicante, 2020).

○ *Redondez y esfericidad.* Aquí se considera la presencia de bordes o aristas, o bien, la falta de estas. Las partículas en muchas rocas sedimentarias tienen los bordes redondeados (Figura 33), debido a que sus bordes angulosos fueron redondeados por la abrasión durante el transporte (Arandia, 2018). Una vez que los bordes han sido redondeados, la partícula cambia su aspecto a una forma más esférica, la esfericidad se relaciona con las diferencias existentes entre los distintos diámetros o longitudes de los ejes de una partícula (Adams *et al.*, 1997).

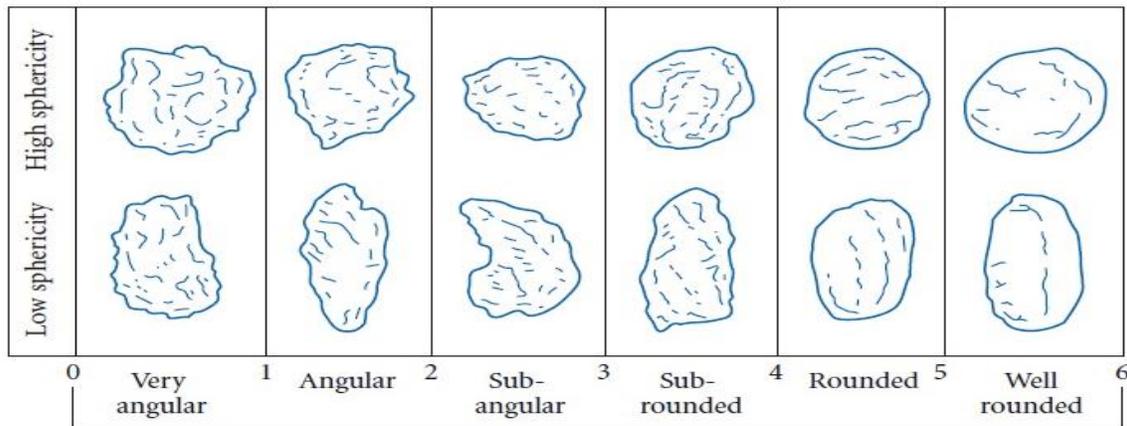


Figura 33. Grado de redondeamiento y esfericidad (Modificado de Powers, 1953; Universidad de Alicante, 2020).

○ *Madurez textural y mineralógica.* Hace referencia al grado de desarrollo que han alcanzado los procesos generadores de un sedimento y que conducen a sedimentos estables composicional y texturalmente homogéneos (sedimentos maduros) (Arandia, 2018).

La madurez mineralógica (Tabla 3) que implica la presencia de minerales químicamente más estables y físicamente más resistentes, de modo que existe una tendencia a formar sedimentos monominerales de cuarzo, ya que éste es el mineral más estable según la secuencia inversa de Bowen (Universidad de Alicante, 2020).

Tabla 3. Clasificación de madurez composicional.

Madurez composicional		
Inmaduro	Submaduro	Maduro
Esqueleto de la roca constituido por minerales de baja estabilidad química como piroxeno o anfíboles, junto a otros más estables como feldespatos y cuarzos.	Esqueleto de la roca constituido por feldespatos y cuarzo, habiendo desaparecido lo más inestable.	La composición mineralógica es exclusivamente cuarzo junto a minerales resistentes como circón, rutilo, turmalina, etc.

La madurez textural, que representa el grado de desarrollo que han alcanzado los procesos de transporte y sedimentación, y si éstos han sido o no selectivos (Adams *et al.*, 1997), normalmente los sedimentos tienden a alcanzar un estado en la que los clastos presentan un alto grado de redondez, esfericidad y selección. Una roca con madurez textural alta está asociada a un transporte intenso de sus componentes y a un fuerte retrabajamiento.

Por otro lado, una roca con madurez textural baja está asociada a poco transporte y poco retrabajamiento, es decir, a menor contenido en matriz y una buena clasificación y redondez, se tiene una mayor madurez (Tabla 4).

Tabla 4. Clasificación de madurez textural.

Madurez textural			
Inmaduro	Submaduro	Maduro	Supermaduro
Los clastos están mal seleccionados (índice de <0.5) mal redondeados (índice de <3), presentando un contenido alto de arcilla.	Los clastos están mal seleccionados y redondeados pero la presencia de arcilla es escasa (índice de < 5%)	Los clastos están bien seleccionados índice de > 0.5) pero mal redondeados y con un bajo contenido de arcillas.	Los clastos están bien seleccionados, bien redondeados (índice > 3) y con escaso contenido de arcilla.

4.3.2 Preparación de las muestras

4.3.2.1 Contenido de humedad

Para determinar el contenido de humedad, se seleccionó una porción de material (500 g). El material se secó en un horno con temperatura controlada a 110 ± 5 °C por 24 horas. El peso del suelo que permanece del secado en horno se usó como el peso de las partículas sólidas. La diferencia entre el peso previo al secado y el posterior al secado es considerada como el peso del agua.

El procedimiento para obtener este parámetro consistió en pesar la muestra, secarla en el horno a temperatura controlada y volver a pesar la muestra una vez enfriado. Para el cálculo del contenido de agua (w) se utilizó la Ecuación 1, donde Sh corresponde a la masa del material estando húmeda (como se extrajo de campo) y Ss es la masa del suelo seco (después de estar 24 horas en el horno).

$$w = \frac{Sh - Ss}{Ss} * 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

4.3.2.2 Densidad de los sólidos

La densidad de sólidos se define como la relación que existe entre el peso de los sólidos y el peso del volumen del agua desalojado por los mismos (Polanco, 2009). Para la obtención de este parámetro se tomó una fracción de la muestra, se secó al horno y se dejó enfriar, posteriormente se pesó y a este dato se le denominó (W_s). Por otra parte, se preparó un matraz llenando hasta la mitad de la parte curva con agua, se vaciaron los sólidos ya pesados empleando un embudo y cuidando en todo momento no tirar material ya que todo está contabilizado (Figura 34A). Se extrajo el aire atrapado en el suelo empleando la bomba de vacíos (Figura 34B). Se completó la capacidad del matraz con agua hasta la marca del aforo, se pesó el matraz + el agua + los sólidos y se le denominó (W_{mws}) (Figura 34C).

Se tomó la temperatura de la suspensión y con la curva de calibración del matraz se obtuvo el peso del matraz más agua hasta la marca del aforo y se le llamó (W_{mw}). Se sustituyeron los valores en la siguiente fórmula para determinar el valor de la densidad:

$$\rho_s = \frac{W_s}{W_s + W_{mw} + W_{mws}} \quad \text{Ecuación 2}$$

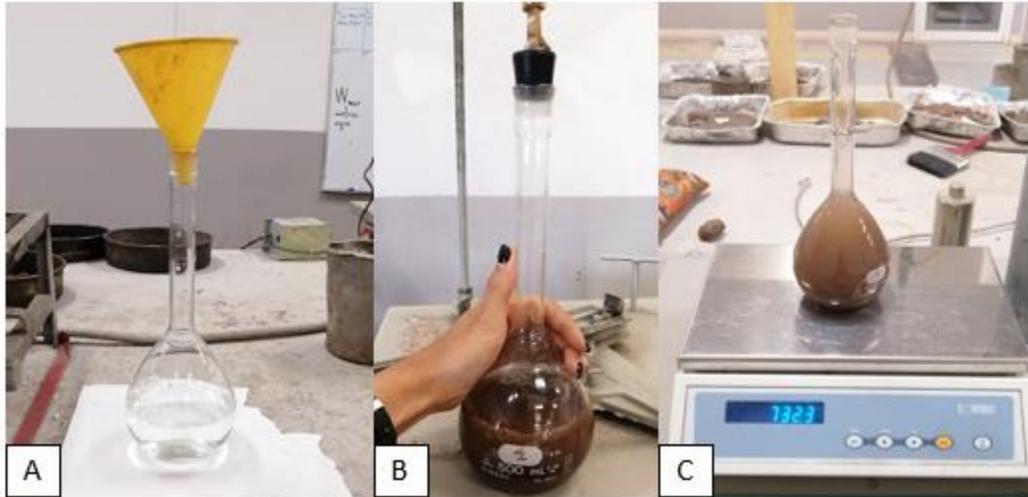


Figura 34. Obtención de densidad de sólidos

4.3.2.3 Densidad aparente

Sirve para determinar el contenido total de porosidad en un suelo y su interpretación permite interpretar la facilidad con que circulan tanto el agua como el aire por la estructura del terreno en estudio (Doran y Parkin, 1994). Para determinar la densidad aparente de un suelo, existen varios métodos.

Se utilizó el método de la parafina sólida (*paraffin wax method*) cuyo procedimiento se basa en el principio de Arquímedes. Esto es, que el volumen de la muestra sumergida se traducirá en el volumen del agua desplazada. Para lograr que la muestra de suelo se mantuviera inalterada durante el proceso, se cubrió con varias capas de parafina (Figura 35), que pasa rápidamente de un estado líquido (entre 60° y 70°) a uno sólido a temperatura ambiente. De este modo, se logra evitar que la humedad penetre la muestra y sature los poros. También se evita que la muestra se disuelva en el agua.

Se debe tomar una muestra de suelo “inalterada”, es decir, un agregado de material que conserve las características de campo se pesó y registró la masa húmeda de la muestra (W_m), posterior a esto, se sumergió por en parafina derretida a una temperatura de entre 60-70°C, se dejó secar la parafina dejando que el exceso de parafina estile y dejó secar todo el revestimiento. Se repitió la inmersión y secado hasta que se formó una capa que cubrió totalmente el material, una vez cubierta, se dejó enfriar y se registró la masa de la muestra recubierta con parafina (W_{m+p}). Una

vez obtenido el peso (Tomás *et al.*, 2013), se sumergió la muestra recubierta con parafina en un recipiente con agua y se obtuvo el peso (V_{m+p}), la densidad (γ_d , kg/m^3) se obtuvo con la siguiente fórmula.

$$\gamma_d = \frac{\frac{W_m}{V_m}}{1 + \frac{w}{100}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde V_m es el volumen del material, el cual se obtiene de restar el V_{m+p} menos el volumen de la parafina (V_p).

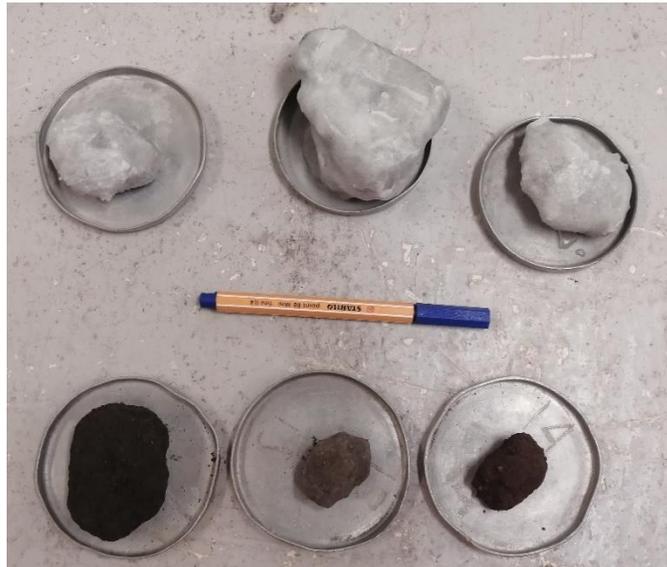


Figura 35. Terrones de material cubiertos de parafina

4.3.3 Caracterización granulométrica

Una vez recolectadas las muestras de suelo, fueron transportadas al Laboratorio de Mecánica de Suelos y Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, donde fueron separadas en submuestras (4 partes) para realizar diferentes estudios con ellas.

La metodología empleada para ello consistió en las operaciones de secado, disgregado y cuarteo, necesarias para obtener las porciones representativas en condiciones adecuadas para efectuar los ensayos correspondientes (Polanco, 2009).

En el manual de *Métodos de muestreo y prueba de materiales*, publicado en el 2003 por la SCT, se menciona como que el secado tiene por objeto facilitar la

disgregación y manejo de las muestras. La disgregación tiene por objeto separar las diferentes partículas que constituyen la muestra cuando esta contiene grumos. Y el cuarteo, se realiza con el objetivo de obtener proporciones representativas de tamaño adecuado para efectuar pruebas de laboratorio que se requieran a partir de una muestra recolectada en campo (Figura 36).



Figura 36. Cuarteo del material.

Para el secado se utilizó un horno con una temperatura controlada de 105° centígrados (Figura 37), la disgregación se hizo con un mazo de madera y metal con el que se golpeó el suelo de manera vertical desde una altura de 20 cm hasta que se obtuvieron partículas que ya no eran disgregables.



Figura 37. Secado del material.

Una vez obtenidas muestras representativas del suelo secado, disgregado y cuarteado, estas fueron pesadas y esos datos registrados Se procedió a pasar el

material por las diferentes mallas (Figura 38A), que van de mayor a menor abertura empezando por la malla de 2" (ya que el suelo contiene poco material grueso), 1", $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", No.4, No.200 (Figura 38B y Figura 38C), las mallas No.10, No.20, No.40, No.60, No.100, No. 200 se utilizaron después del lavado del suelo. El material que fue retenido se fue registrando.



Figura 38. Pesado y tamizado del material

Se obtuvo una porción de suelo representativa con el material que pasa la malla No. 4, para ello se pasó el material varias veces por el partidor de muestras, hasta que se obtuvieron cantidades de 300 gr aproximadamente.

4.3.3.1 Lavado de suelo

El procedimiento de “lavado del suelo” realizado con las muestras obtenidas, consistió en colocar el material en un vaso de aluminio y agregar agua hasta llenarlo (Figura 39A), posteriormente se agitó utilizando un alambón con punta redondeada, haciendo figuras en forma de “ochos” durante 15 segundos.

Se vació el líquido a la malla No. 200, con el fin de eliminar los finos (material que pasa dicha malla), posteriormente se vertió más agua al vaso y se agitó de la forma antes descrita. Cuando en la malla se acumule material (arena), se reintegra al vaso, vaciando agua sobre el reverso de la malla, siempre cuidando el no perder

material; esto se hizo cada 5 veces que se vacíe agua con finos a la malla No. 200 (Figura 39B).

La operación se repitió varias veces hasta que el agua salió limpia o lo más cristalina posible. El material se secó en la estufa, se dejó enfriar y se pasó por las mallas 10, 20, 40, 60, 100 y 200. Finalmente se pesó el material retenido en cada una de ellas, se realizaron los cálculos de: % retenido parcial, % retenido acumulado, % que pasa y se dibujaron las correspondientes curvas granulométricas para cada una de las muestras.



Figura 39. Lavado del suelo

4.3.3.2 Límites de consistencia

Para iniciar el procedimiento, primero se cribó el material y se pasó por la malla No. 40, después se vació en una capsula de porcelana y se humedeció durante 24 horas.

En este caso se obtuvieron los límites plástico y líquido. De los cuales el Límite Líquido (LL) es la frontera comprendida entre los estados semilíquido y plástico, se define como el contenido de humedad que requiere un suelo previamente remoldeado, en el que al darle una forma trapezoidal sus taludes fallen simultáneamente cerrándose la ranura longitudinalmente 13 mm, al sufrir el impacto de 25 golpes consecutivos utilizando una Copa de Casagrande.

Por otro lado, el Límite Plástico (LP) es la frontera entre el estado plástico y semisólido. Se define como el contenido de humedad que posee un cilindro de material al presentar agrietamiento en su estructura.

Para la obtención del LL se mezcló el material con agua hasta tener una mezcla manejable, se colocó en la Copa de Casagrande, distribuyéndolo del centro hacia los extremos, de manera que en el centro quedara una superficie a nivel, se realizó una ranura de manera perpendicular a la distribución del material. Una vez que se tuvo la ranura se procedió a golpearla con una frecuencia de dos golpes por segundo hasta que los taludes del material se unieron (13 mm).

Se llevó el registro del número de golpes dados, pues se debía cumplir con la condición de un número de golpes de entre 4 y 40 para que la prueba sea considerada como bien ejecutada. Es recomendable obtener muestras con intervalos que vayan de 4 a 10 golpes, de 10 a 20, 20 a 30 y de 30 a 40. Esto es para que al graficar número de golpes vs contenido de agua se tenga mayor claridad en la curva de fluidez. En cada uno de los ensayos se tomó muestra del centro de la Copa, y se colocaron en taras (previamente pesadas) y se anotó el peso del material más la tara, posterior a esto, se llevó al horno para determinar el contenido de humedad de cada muestra.

Para la obtención del LP se utilizó la muestra menos húmeda y con ella se hizo una esfera de 1.5 cm, esta esfera se giró en la palma de la mano o sobre una superficie lisa (una placa de vidrio), buscando hacer un cilindro de 3.2 mm de diámetro, si el material se agrieta se dice que el suelo presenta límite plástico y se obtendrá muestra del suelo, siguiendo el procedimiento de pesado de tara, del material girado más la tara y medición posterior al secado en el horno. Para la obtención del Índice Plástico (IP) se resta el LL menos el LP.

4.3.4 Clasificación del suelo

Villalaz (2004), menciona como debido a la gran variedad de suelos en la naturaleza, la Mecánica de Suelos ha desarrollado métodos para clasificarlos.

Cada uno de estos métodos tiene su campo de aplicación según la necesidad y uso. Y así se tiene la clasificación de los suelos según el tamaño de sus partículas, la clasificación de la Asociación Americana de Oficiales de Caminos Públicos (*American Association State Highway Officials*), la clasificación de la Administración de Aeronáutica Civil (C.A.A.), el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

(S.U.C.S.), entre otros (Villalaz, 2004). En esta tesis se trabajó con la clasificación del S.U.C.S.

- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.).

Villalaz (2004), indica que este sistema fue presentado por Casagrande como una modificación y adaptación más general a su sistema de clasificación, propuesto en 1942 para aeropuertos. La clasificación se basa en una Tabla (Figura 40) en la que se destaca la identificación de los suelos de partículas gruesas y los suelos de partículas finas se distinguen mediante el cribado del material por la malla No. 200. Los suelos gruesos corresponden a los retenidos en dicha malla y los finos a los que la pasan, y así un suelo se considera grueso si más del 50% de las partículas son retenidas en la malla No. 200 y fino si más del 50% de sus partículas son menores que dicha malla.

Los suelos se designan por símbolos de grupo. El símbolo de cada grupo consta de un prefijo y un sufijo. Los prefijos son las iniciales de los nombres ingleses de los seis principales tipos de suelos (grava, arena, limo, arcilla, suelos orgánicos de grano fino y turba), mientras que los sufijos indican subdivisiones en dichos grupos (Villalaz, 2004).

En los suelos gruesos se tienen las gravas que se designan con la letra “G” y las arenas identificadas con la letra “S”, de modo que se clasificará un suelo como gravas si más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4 y pertenecerá al grupo de las arenas en caso contrario (Villalaz, 2004).

Las arenas y las gravas se subdividen en 4 grupos separadas como: GW, GP, GM y GC, así como las arenas en: SW, SP, SM y SC. En el símbolo GW, el prefijo G (*gravel*) se refiere a las gravas y W (*well graded*) quiere decir bien graduado. De igual modo el símbolo GP indica gravas pobremente o mal graduadas (*Poorly graded gravel*), el símbolo GM indica gravas limosas, y el símbolo GC indica gravas arcillosas, donde C indica arcillas (*Clay*). Así mismo, los símbolos SW, SP, SM Y SC indican arenas (*sands*) bien graduadas, mal graduadas, arenas limosas y arenas arcillosas respectivamente (Villalaz, 2004).

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACION DE SUELOS (SUCS) ASTM D 2487

Criterios para la asignación de símbolos de grupo y nombre de grupo con el uso de ensayos de laboratorio			Clasificación de suelos		
			Símbolo de grupo	Nombre del grupo	
Suelos de partículas gruesas más del 50% es retenido en la malla No. 200	Gravas limpias Menos del 5% pasa la malla No. 200	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3$	GW	Grava bien graduada	
		$Cu < 4$ y $1 > Cc > 3$	GP	Grava mal graduada	
	Gravas con finos Mas del 12% pasa la malla No. 200	IP < 4 o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad	GM	Grava limosa	
		IP > 7 o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad	GC	Grava arcillosa	
	Gravas limpias y con finos Entre el 5 y 12% pasa malla No.200	Cumple los criterios para GW y GM	GW-GM	Grava bien graduada con limo	
		Cumple los criterios para GW y GC	GW-GC	Grava bien graduada con arcilla	
		Cumple los criterios para GP y GM	GP-GM	Grava mal graduada con limo	
		Cumple los criterios para GP y GC	GP-GC	Grava mal graduada con arcilla	
	Arenas El 50% o mas de la fracción gruesa pasa la malla No. 4	Arenas limpias Menos del 5% pasa la malla No. 200	$Cu \geq 6$ y $1 \leq Cc \leq 3$	SW	Arena bien graduada
			$Cu < 6$ y $1 > Cc > 3$	SP	Arena mal graduada
Arenas con finos Mas del 12% pasa la malla No. 200		IP < 4 o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad	SM	Arena limosa	
		IP > 7 o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad	SC	Arena arcillosa	
Arenas limpias y con finos Entre el 5 y 12% pasa malla No.200		Cumple los criterios para SW y SM	SW-SM	Arena bien graduada con limo	
		Cumple los criterios para SW y SC	SW-SC	Arena bien graduada con arcilla	
	Cumple los criterios para SP y SM	SP-SM	Arena mal graduada con limo		
Suelos de partículas finas El 50% o mas pasa la malla No. 200	Limos y arcillas Limite Líquido menor que 50	IP > 7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"	CL	Arcilla de baja plasticidad	
		IP < 4 y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"	ML	Limo de baja plasticidad	
	Orgánicos	Limite liquido - secado al horno < 0.75	OL	Arcilla orgánica	
		limite liquido - no secado		Limo orgánico	
	Limos y arcillas Limite Líquido mayor que 50	IP > 7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"	CH	Arcilla de alta plasticidad	
		IP < 4 y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"	MH	Limo de alta plasticidad	
	Orgánicos	Limite liquido - secado al horno < 0.75	OH	Arcilla orgánica	
		limite liquido - no secado		Limo orgánica	
	Suelos altamente orgánicos	Principalmente materia orgánica de color oscuro	PT	Turba	

Elaborado por: Ing. Iván Matus Lazo y Ing. Marvin Blanco Rodríguez

Figura 40. Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS) ASTM D 2487 (Borselli, 2017).

Así como para los suelos gruesos se subdivide en grupos, también existe una subdivisión para los suelos finos, que consta de 3 grupos para limos y arcillas con límite líquido menor a 50%, en tres grupos para limos y arcillas con límite mayor a 50% y en un grupo para los suelos finos altamente orgánicos.

Si el límite líquido del suelo es menor de 50%, es decir, el suelo es de compresibilidad baja o media, se añade el sufijo *L* (*Low compresibility*) a los prefijos *M*, *C* y *O*, obteniéndose los símbolos *ML* (limos inorgánicos de baja compresibilidad), *CL* (arcillas inorgánicas de baja compresibilidad) y *OL* (limos orgánicos de baja compresibilidad). Si en cambio el límite líquido es mayor de 50%, el suelo es de compresibilidad alta se añade el sufijo *H* (*High compresibility*) a los prefijos *M*, *C* y *O* dando como resultado *MH* (limos orgánicos de alta compresibilidad), *CH* (arcillas inorgánicas de alta compresibilidad) y *OH* (arcillas orgánicas de alta compresibilidad) (Villalaz, 2004).

4.3.5 Pruebas de permeabilidad

Para determinar este parámetro existen varios métodos, pueden ser los utilizados en campo, métodos empíricos donde el valor el coeficiente de permeabilidad (k) se obtiene indirectamente con otras propiedades del suelo, finalmente están los ensayos de laboratorio, los cuales pueden ser utilizando permeámetros de carga constante y permeámetros de carga variable (Angelone *et al.*, 2006)

Los permeámetros de carga variable brindan mayor exactitud en suelos menos permeables como arcillas y limos mientras que las pruebas en permeámetros de carga constante son utilizadas en suelos arenosos, limosos o con alto contenido de gravas.

En el caso de las muestras recolectadas y debido a la cantidad de finos se trabajó con el permeámetro de carga constante, realizando una modificación en cuanto a las cargas hidráulica, ya que se trabajó bajo una presión de 100 KPa, la cual representaba un valor alcanzable y fácilmente manejable. El procedimiento empieza desde la obtención del contenido de humedad y de la densidad aparente descrita en el apartado 4.3.2.3, ya que se trabajó con pruebas de compactación para reproducir las condiciones del terreno.

La compactación es la aplicación mecánica de cierta energía o cantidad de trabajo por unidad de volumen para lograr una reducción de espacios entre las partículas sólidas del suelo (Polanco, 2009), con la finalidad de reproducir las características de compactación de terreno.

El procedimiento consistió en trabajar con el material recolectado en campo (bajo las mismas condiciones de recolección), para ellos se necesita un molde de compactación de 0.96 L y su extensión, un pistón de 2.5 kg, una balanza con aproximación de 0.1 g, regla o solera para enrasar y el suelo a utilizar (en este caso se trabajó con cerca de 3 kg por muestra).

Para esto se midió y se pesó (W_t) el molde de compactación y se registró el resultado. Una vez se tuvo el registro se depositó el material del suelo en el molde aproximadamente llenándolo hasta la mitad y compactando con 25 golpes usando el pistón (siguiendo el procedimiento de Prueba Proctor Estándar), se realizó esta

misma acción para depositar 3 capas en total, la última capa no debe salir del molde más de 2.5 cm, posteriormente se enrasó el molde (Figura 41) y se pesó.



Figura 41. Moldes de compactación.

Con este dato se calculó la densidad del material, utilizando la Ecuación 4, donde W_m es el peso del material (habiendo restado el peso del molde) y V_m es el volumen del material (obtenido a partir de las medidas del molde). Este valor nos permitió determinar la densidad del material.

$$\rho_m = \frac{W_m}{V_m} \quad \text{Ecuación 4}$$

Una vez se obtuvo la densidad del material, se calculó el peso volumétrico del suelo seco utilizando para ello la información del contenido de humedad (Ecuación 5).

$$\gamma_d = \frac{\rho_m}{1 + \frac{w}{100}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Posteriormente, el dato obtenido se comparó con el calculado de densidad aparente descrita en el capítulo 4.3.2.3, el dato obtenido debió ser similar a los calculados con el método de parafina, considerando una variación máxima del 5%, si el valor de γ_d presenta un rango de error mayor se repite la prueba con una cantidad menor de golpes, es decir, se ajustó la cantidad de golpes para obtener el grado de compactación real de campo.

Ya que se cumplieron las condiciones, se retiró el cilindro del molde (Figura 42A) y se adaptó al tamaño del permeámetro (Figura 42B y C), cuidando en todo momento de no dejar espacios entre la pared del cilindro del permeámetro y el cilindro del material.

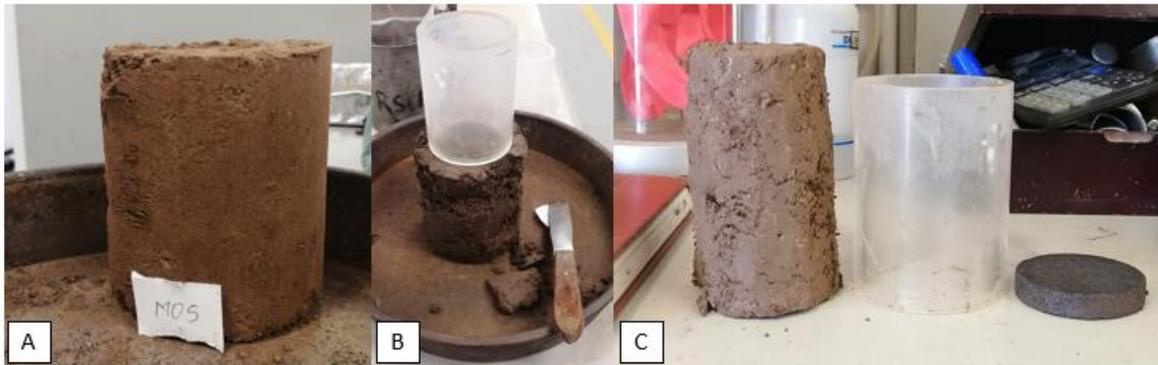


Figura 42. Preparación del cilindro de material

La prueba consistió en introducir la muestra de suelo en el permeámetro (Figura 43), se midieron la longitud (L) y el área de la muestra (A). Se tapó el permeámetro y se selló perfectamente para evitar fugas de agua (Figura 44).



Figura 43. Muestra depositada en el permeámetro



Figura 44. Permeámetro sellado

Se conectaron el equipo de almacenamiento e inyección de agua, conectado al permeámetro mediante una manguera (Figura 45A). Se saturó el material del permeámetro buscando sacar todo el aire contenido en el mismo. Se estableció la carga hidráulica de 100 KPa (Figura 45B y Figura 45C), debido a la facilidad para mantener esta carga constante, que equivale a 10.21 metros de columna de agua.

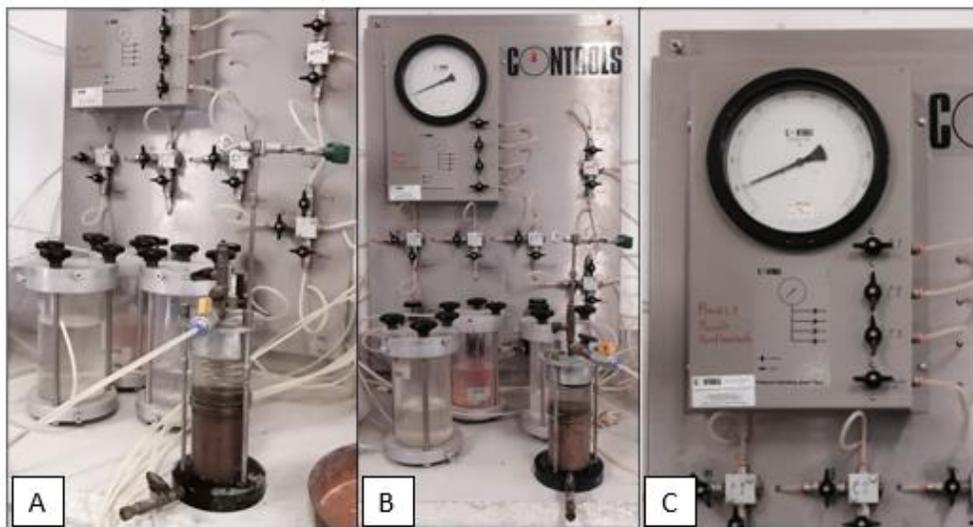


Figura 45. Equipo para prueba de permeabilidad

Establecidas las condiciones y saturado el material, se procedió a abrir la línea de flujo, iniciando el conteo de tiempo y recolectando el agua que atravesaba el material en un recipiente de volumen conocido (Figura 46).



Figura 46. Probetas con agua recolectada

Una vez obtenidos todos los datos se procedió a utilizar la siguiente fórmula para calcular el coeficiente de permeabilidad.

$$k = \frac{VL}{tAh} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde V es el volumen recolectado en la probeta, L se refiere a la longitud del cilindro de material utilizado en la prueba, t es el tiempo, A es el área del cilindro y h es la carga hidráulica.

4.3.6 Análisis de sedimentos

Para determinar concentraciones de ciertos elementos se utilizaron diversas técnicas y métodos como lo son el Método de Ensaye al fuego/Absorción atómica, Digestión con 4 ácidos (HCl, HNO₃, HClO₄ y HF) y Método por Espectrómetro de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES). Todos realizados en el Servicio Geológico Mexicano, en la Tabla 5 se indica la simbología empleada para los resultados.

Los elementos analizados fueron plata (Ag), aluminio (Al), arsénico (As), Oro (Au), bario (Ba), berilio (Be), bismuto (Bi), calcio (Ca), cadmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), fierro (Fe), potasio (P), magnesio (Mg), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), sodio (Na), níquel (Ni), fósforo (P), plomo (Pb), antimonio (Sb), escandio (Sc), selenio (Se), estaño (Sn), estroncio (Sr), telurio (Te), titanio (Ti), talio (Tl) , uranio (U), vanadio (V), tungsteno (W) y zinc (Zn). Todos fueron analizados con digestión de ácidos y con el ICP-OES, menos el oro, el cual se analizó mediante absorción atómica (AA).

Tabla 5. Equivalencias y simbología utilizada por el SGM.

Equivalencias	Símbolos de las unidades utilizadas (Sistema Internacional)
1 µg/kg = 1 ppb 1 mg/kg = 1 ppm = 1 g/t 1 mg/kg = 1000 µg/kg 1 mg/L = 1 mg/kg = 1 ppm 10000 mg/kg = 1,0%	µg: microgramo mg: miligramo kg: kilogramo t: tonelada L: Litro DPL: Duplicado considerado como control de calidad

4.3.7 Diseño y construcción de columnas

El uso de columnas de suelo es un método sencillo para evaluar el transporte de solutos y algunos minerales (Sánchez *et al.*, 2012). Los estudios de laboratorio permiten analizar los procesos de interés bajo condiciones controladas o al menos conocidas como las dimensiones de la muestra, el contenido de humedad, el volumen de agua, etc., logrando establecer variables que difícilmente son controlables en campo.

Para la realización de esta investigación se trabajó con un prototipo de materiales accesibles, el diseño propuesto para la construcción de las columnas se describe a continuación:

- 1) Se utilizaron tubos de polícloruro de vinilo (PVC) de 10.16 cm de diámetro por 99.06 cm de largo, siendo el material de 0.64 cm de espesor;
- 2) Se sellaron los extremos con tapas que permiten encapsular el material y la humedad (Figura 47a), la unión se realizó con pegamento especial para PVC y silicón para evitar fugas;
- 3) Las tapas fueron perforadas con un taladro para instalar una llave de desagüe en la parte baja y una línea de suministro en la parte superior (Figura 47b) en esta se vertió agua destilada de forma controlada;
- 4) En la tapa inferior se le instaló llaves de 2.54 cm (Figura 47c) que permitieron colectar el efluente de acuerdo con los tiempos establecidos según el tipo de material;

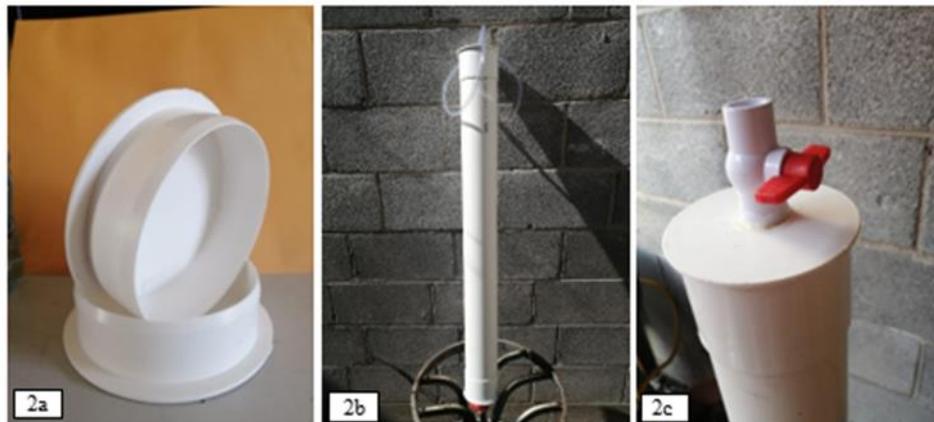


Figura 47. Diseño experimental - prototipo inicial.

- 5) En la tapa inferior por la parte interior de la columna se colocó una malla y un filtro para evitar la obstrucción de la llave y retener el material fino, colectando así solo el agua introducida, y;
- 6) Las columnas se colocaron sobre una base de madera de 1 pulgada de espesor, por 8 pulgadas de ancho y 48 pulgadas de largo, utilizando otro soporte de madera en la parte superior para mantener las columnas de manera vertical, todo esto se colocará sobre ángulos metálicos y de ser necesario se anclarán las columnas a la

pared para mayor seguridad, en la Figura 48 se muestra una representación del soporte para las columnas.

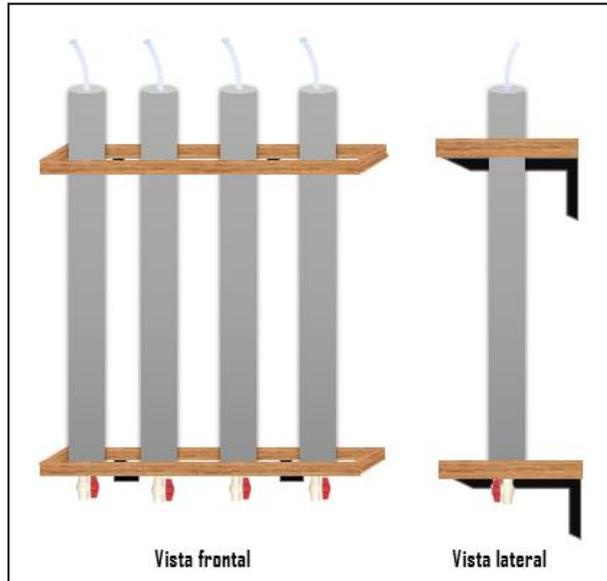


Figura 48. Diseño del soporte para las columnas de suelo.

Además del prototipo inicial, se trabajó con columnas de acrílico conocidas como Tempe Cell, las cuales miden 50 cm de largo por un diámetro de 5 cm (Figura 49). Para soportar las columnas se utilizó una base de madera para dos equipos.



Figura 49. Equipo Tempe Cell.

4.3.8 Experimentos de columnas y análisis químico de lixiviados

La lixiviación es una de las formas de recuperación de un metal o compuesto desde su mena por medio de una solución que fluye disolviendo las especies de interés desde la roca, es aplicable para minerales que requieren de reacciones químicas, aguas de descartes y soluciones de formación natural (Serrano, 2013).

Éstas han probado ser una herramienta de caracterización útil en la estimación de efectos medioambientales en varios países. El contenido total de un contaminante en un material (ejemplo un suelo) no es determinante, sino su capacidad de ser movilizado hacia el agua (fase acuosa), a esto se le llama movilidad de contaminante o lixiviación (Erdem y Özverdi, 2008). El uso de estas pruebas está cambiando significativamente, ya que cada vez más los resultados obtenidos son considerados para la disposición de residuos y en el beneficio para el reúso de materiales en la construcción.

Para la realización de los experimentos, primeramente, se colocaron en las bases de las columnas los filtros para retener el material fino, posteriormente, se depositó el material dentro de las columnas con ayuda de un cucharón y un embudo, mientras se depositaba el material se le estuvieron dando pequeños golpes a la columna en los costados para ir acomodando el material, buscando simular el suelo en estado natural (Figura 50), cabe destacar que no se compactó el material al estrés presente in situ. Este proceso se llevó a cabo con las 15 muestras.



Figura 50. Llenado de columnas

Una vez completado lo anterior, se colocaron los depósitos de agua destilada sobre las columnas y se conectaron las líneas de suministro (Figura 51A), para ello se utilizaron equipos de venoclisis que permitieron controlar el flujo de agua que ingresa a la columna, después se abrieron las válvulas inferiores (Figura 51B) y se colocaron los recipientes de recolección. Teniendo los depósitos y columnas listas, se procedió a abrir las líneas de suministro de los depósitos superiores (Figura 51A), en este punto se inició la contabilización del tiempo con el cronómetro.

Las líneas que conectan a los depósitos superiores se abrieron y cerraron de manera que se mantuvo un flujo constante y un tirante de agua en la parte superior de la columna (aproximadamente 5 cm) como se muestra en la Figura 52, esto con la finalidad de saturar las columnas, cabe mencionar que los tiempos de saturación para cada una de ellas variaron ya que las 15 muestras son diferentes.

Una vez que la columna estuvo totalmente saturada, empezó a gotear por la parte inferior donde se colectó el efluente, utilizando envases previamente lavados con ácido clorhídrico (Figura 51C).

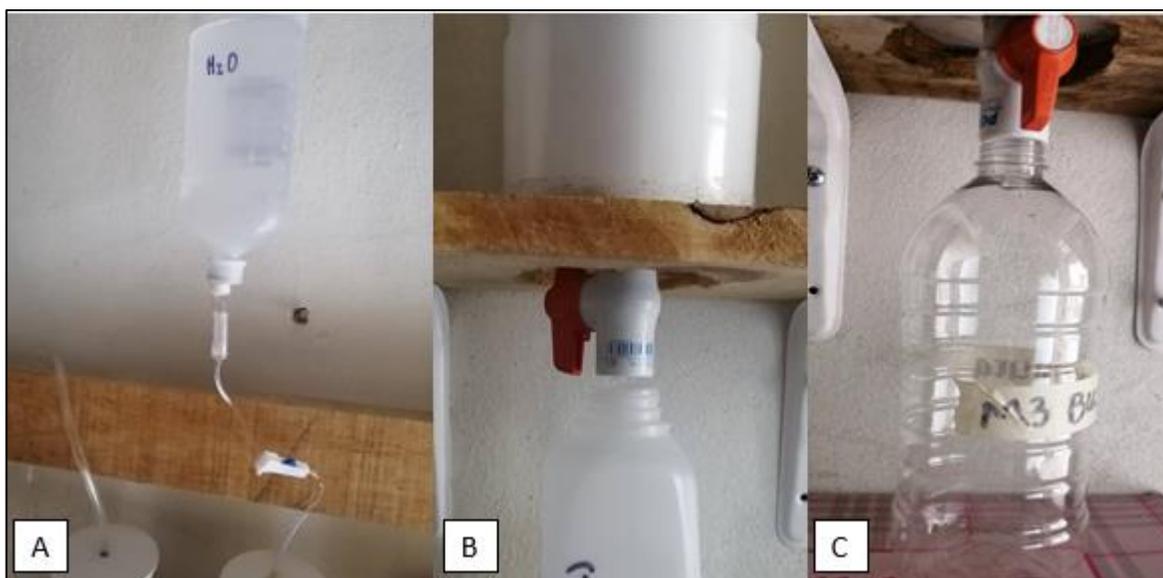


Figura 51. Preparación de líneas, válvulas y contenedores

Durante la prueba se tomaron los tiempos de acuerdo con la cantidad de agua depositada (en la finalización de cada litro de agua destilada utilizado), así como el tiempo transcurrido hasta el inicio de goteo de la columna, además, el tiempo en que se llenaron los primeros recipientes.

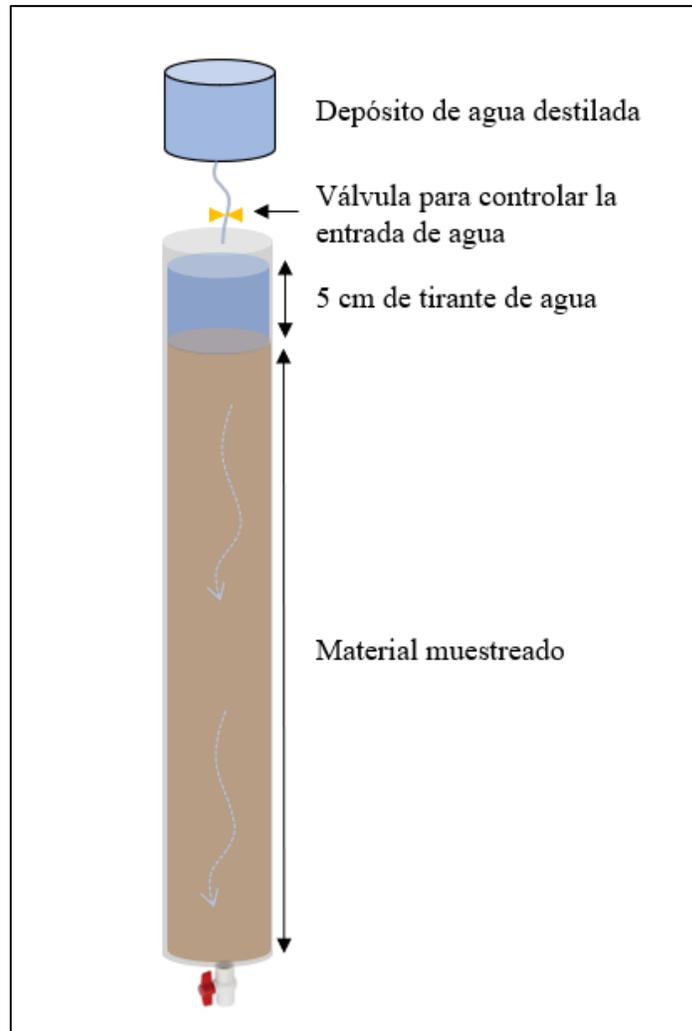


Figura 52. Esquema de columna de suelo con paso de agua a través de ella

Para el análisis químico se enviaron 17 litros de agua al Laboratorio de Ingeniería Sanitaria, siendo 15 muestras de lixiviados y 2 muestras de agua destilada utilizada para los experimentos, además, se enviaron 8 de estas muestras (Figura 53) a un laboratorio externo, Servicio Geológico Mexicano.



Figura 53. Muestras de lixiviado enviadas a laboratorio externo

4.4 Trabajo de gabinete

Dentro de los trabajos realizados en gabinete se encuentran la elaboración de tablas y figuras, así como también el análisis de correlación entre los resultados de lixiviados y digestión de ácidos.

Capítulo 5. Discusión de resultados

5.1 Análisis sedimentológico

Una vez que se tomaron las muestras en campo, se realizó la caracterización sedimentológica en el Laboratorio de Geología. Utilizando una lupa marca Olympus, a través de la observación detallada se analizó el material de cada punto de muestreo.

A continuación, se describe la muestra M00. Cabe mencionar que para las fotografías de las muestras (Anexo D) se utilizó un acetato como red de 1 mm x 1 mm para escala. En la muestra M00, correspondiente a un banco de arena localizado en Nicolás Bravo, el material se compone de granos subangulosos de alta esfericidad, bien clasificado, el tamaño de grano ronda el medio milímetro de diámetro, el color del material es café claro. Presenta una madurez mineralógica buena, esta va de maduro a super maduro, se aprecia un alto contenido de cuarzo (Figura 54).



Figura 54. Muestra M00 en lupa

La Tabla 6, donde se resume la descripción de cada una de las muestras, indicando su clasificación, tamaño del material, color de acuerdo con la escala de color de Munsell (2000), madurez textural y mineralógica, así como los minerales visibles. Las descripciones detalladas se indican en el Anexo D.

Tabla 6. Descripción sedimentológica para las muestras analizadas en esta tesis.

Muestra	Clasificación	Esfericidad	Tamaño (mm)	Código de color	Mineralógica	Madurez	Textural	Minerales visibles
M00	Buena	Alta	0.5	10YR8/1	Maduro		Maduro	Cuarzo
M01	Pobre – mal clasificado	Alta	0.125	5YR3/4	Submaduro		Submaduro	Cuarzo y feldespatos
M02	Pobre – mal clasificado	Baja	0.125	2.5YR3/2	Inmaduro		Inmaduro	
M03	Pobre – mal clasificado	Baja	0.125	2.5YR2.5/3	Submaduro		Submaduro a inmaduro	
M04	Moderadamente clasificada	Alta	< 0.25	10YR2/2	Inmaduro		Inmaduro a submaduro	Cuarzo
M04B	Pobre – mal clasificado	Baja	< 0.25	10YR6/1	Inmaduro		Inmaduro	
M05	Pobre – mal clasificado	Baja	< 0.5	2.5YR3/3	Submaduro		Submaduro	Cuarzo
M06	Pobre – mal clasificado	Alta	< 0.125	5YR4/4	Submaduro		Submaduro	Cuarzo y plagioclasa
M07	Moderadamente clasificada	Baja	0.25-0.125	5YR5/3	Inmaduro a submaduro		Submaduro	Cuarzo
M08	Pobre – mal clasificado	Baja	10 -0.25	7.5YR2.5/1	Inmaduro		Inmaduro	Oxido de manganeso y fierro
M09	Pobre - mal clasificado	Baja	< 0.075	7.5YR3/1	Inmaduro		Inmaduro	Biotita
M10	Mal - moderadamente clasificado	Baja	0.5 – 0.125	10YR4/6	Submaduro		Inmaduro	Biotita y cuarzo
M11	Moderadamente bien clasificado	Baja	0.25	5YR3/2	Inmaduro		Inmaduro	Cuarzo
M12	Pobre – mal clasificado	Baja	1-0.25	5YR2.5/2	Submaduro		Inmaduro	Cuarzo, ferromagnesianos, feldespatos/plagioclasas
M13	Pobre – mal clasificado	Baja	10-0.125	10YR3/2	Submaduro a inmaduro		Inmaduro	Cuarzo y posible galena

5.2 Caracterización granulométrica y clasificación del suelo

Después de realizar las pruebas necesarias, se obtuvieron los porcentajes del material que atraviesa cada una de las mallas, en la Tabla E26 del Anexo E se indica el porcentaje de material que pasó cada malla de las muestras M00 a la M04, en la Tabla E27 de la muestra M04B a la M08 y en la Tabla E28 de la M09 a la M13. Por otro lado, en el Anexo E se indican además las curvas granulométricas para cada una de las muestras analizadas, donde se compara el porcentaje de material que pasa cada malla contra el diámetro de la partícula.

De acuerdo con estos datos se puede observar que las muestras con mayor contenido de finos son la muestra M09, M11, M07 y M13, con un 87.67%, 82.66%, 73.95% y 68.90% respectivamente, además, se tienen las muestras M02, M06 y M04B con más del 50% de material que pasa la malla 200 (Tabla 7). Por otra parte, se tiene el material de la muestra M00, en la cual la mayor cantidad de material se queda retenido entre la malla 60 y 100.

Tabla 7. Porcentaje de finos que pasan la malla No. 200

Muestra	% de Finos que pasan la malla No. 200	ACUÍFERO
M00	2.68 %	Muestra Base
M01	20.22 %	Buenaventura
M02	56.63 %	Buenaventura
M03	17.79 %	Buenaventura
M04	49.65 %	Cuauhtémoc
M04B	50.72%	Cuauhtémoc
M05	30.30%	Cuauhtémoc
M06	59.32%	Cuauhtémoc
M07	73.95%	Cuauhtémoc
M08	24.79%	Cuauhtémoc
M09	87.67%	Meoqui Delicias
M10	32.18%	Meoqui Delicias
M11	82.66%	Meoqui Delicias
M12	26.46%	Meoqui Delicias
M13	68.90%	Meoqui Delicias

Una vez que se tuvieron los datos de los límites líquido y plástico de cada una de las muestras se clasificó el material según el S.U.C.S. De acuerdo con la información analizada se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 8).

Tabla 8. Clasificación de acuerdo con S.U.C.S.

MUESTRA	CLASIFICACIÓN S.U.C.S.	ACUÍFERO
M00	(SW) Arenas Bien Graduadas	Muestra Base
M01	(SC) Arena Arcillosa	Buenaventura
M02	(CL) Arcilla de Baja Plasticidad	Buenaventura
M03	(GC) Grava Arcillosa	Buenaventura
M04	(SM) Arena Limosa	Cuauhtémoc
M04B	(CH) Arcilla de alta Plasticidad	Cuauhtémoc
M05	(SM-SC) Arena limosa arcillosa	Cuauhtémoc
M06	(CL) Arcilla de Baja Plasticidad	Cuauhtémoc
M07	(ML – CL) Limo arcilloso de Baja Plasticidad	Cuauhtémoc
M08	(SM-SC) Arena limosa arcillosa	Cuauhtémoc
M09	(MH) Limo de Alta Plasticidad	Meoqui Delicias
M10	(SM) Arena Limosa	Meoqui Delicias
M11	(CL) Arcilla de Baja Plasticidad	Meoqui Delicias
M12	(SC-SM) Arena limosa arcillosa	Meoqui Delicias
M13	(MH) Limo De Alta Plasticidad	Meoqui Delicias

Con base en estos datos, se pudo prever los tiempos de circulación (o de experimentación) en las pruebas de lixiviación en columnas.

5.3 Resultados de permeabilidad

Una vez realizadas todas las pruebas granulométricas y haber obtenido la clasificación del suelo de cada una de las muestras, se procedió a realizar las pruebas y cálculos para obtener los datos de permeabilidad. Los resultados se muestran a continuación en la Tabla 9.

En el Anexo F, en la Tabla F29 se indican los parámetros utilizados para la preparación de los cilindros compactados, en la Tabla F30 se indican los datos obtenidos de la prueba para el cálculo del coeficiente de permeabilidad.

Tabla 9. Resultados de pruebas de permeabilidad

Muestra	Coefficiente Permeabilidad k (cm/s)	Acuífero
M00	9.34E-03	Alta Babícora
M01	4.32E-05	Buenaventura
M02	2.33E-05	Buenaventura
M03	2.56E-05	Buenaventura
M04	5.28E-06	Cuauhtémoc
M04B	4.20E-06	Cuauhtémoc
M05	2.15E-04	Cuauhtémoc
M06	7.27E-05	Cuauhtémoc
M07	3.34E-05	Cuauhtémoc
M08	5.17E-05	Cuauhtémoc
M09	3.22E-06	Meoqui-Delicias
M10	1.56E-05	Meoqui-Delicias
M11	3.01E-04	Meoqui-Delicias
M12	3.06E-05	Meoqui-Delicias
M13	1.02E-04	Meoqui-Delicias

De acuerdo con Angelone *et al.*, (2006), los suelos que presentan coeficientes de permeabilidad en un rango de entre 10^{-5} y 10^{-3} cm/s son los que pueden presentar cierto grado de peligro, ya que pueden permitir el desplazamiento de las partículas por efecto de las fuerzas de filtración.

Para las muestras analizadas, 3 de ellas presentan valores de 10^{-6} siendo muestra que presentan un porcentaje de finos mayor a 49% y contenido de humedad mayores al 13%, por otro lado, la muestra M00, presenta el coeficiente de permeabilidad más alto, siendo un valor de 0.0093 cm/s, característico de las arenas.

5.4 Digestión de sedimentos

Se analizaron 8 de las 15 muestras por medio de digestión con 4 ácidos (HCl, HNO₃, HClO₄ y HF) y el Método por Espectrómetro de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) obtenidas del análisis de muestras enviadas al Servicio Geológico Mexicano (SGM) se determinaron 33 elementos como se muestran en las Tabla 10 y Tabla 11.

Tabla 10. Resultados de Digestión con 4 ácidos y con ICP-OES.

Elemento	Límites de detección	Unidad	Muestra							
			M00	M01	M02	M04	M04B	M09	M010	M11
Ag	1	mg/kg	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Al	0.01	%	0.59	3.15	4.37	3.81	2.58	4.18	2.95	3
As	10	mg/kg	<10	<10	<10	<10	<10	24	<10	22
Au	1x10 ⁻³	mg/kg	<1x10 ⁻³							
Ba	10	mg/kg	55	170	228	223	226	325	609	251
Be	1	mg/kg	<1	1	1	2	1	1	1	1
Bi	10	mg/kg	18	20	19	13	11	13	24	12
Ca	0.01	%	0.16	0.46	1.56	0.97	6.09	5.22	5.46	13.9
Cd	1	mg/kg	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1
Co	1	mg/kg	2	7	11	4	4	5	5	3
Cr	1	mg/kg	42	52	42	31	26	35	40	28
Cu	1	mg/kg	12	16	18	10	11	15	14	20
Fe	0.01	%	1.46	3.59	4.57	2.89	2.15	3.1	4.87	2.15
K	0.01	%	0.15	0.35	0.6	0.65	0.72	0.83	0.38	0.55

Tabla 11. Resultados de Digestión con 4 ácidos y con ICP-OES (continuación).

Elemento	Límites de detección	Unidad	Muestra							
			M00	M01	M02	M04	M04B	M09	M10	M11
Mg	0.01	%	0.16	0.4	0.86	0.77	1.54	1.27	0.85	0.93
Mn	1	mg/kg	300	725	747	429	353	618	782	392
Mo	10	mg/kg	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Na	0.01	%	0.03	0.1	0.14	0.11	0.09	0.26	0.13	0.05
Ni	1	mg/kg	4	16	26	12	10	17	12	13
P	10	mg/kg	200	441	651	504	604	981	497	658
Pb	1	mg/kg	11	24	23	20	16	22	23	78
Sb	10	mg/kg	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Sc	1	mg/kg	3	7	10	6	4	8	7	5
Se	10	mg/kg	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Sn	10	mg/kg	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Sr	1	mg/kg	26	74	189	98	312	385	327	827
Te	10	mg/kg	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Ti	0.01	%	0.34	0.39	0.42	0.18	0.18	0.19	0.38	0.15
Tl	10	mg/kg	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
U	10	mg/kg	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
V	1	mg/kg	20	68	83	35	62	65	99	43
W	10	mg/kg	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Zn	1	mg/kg	50	107	103	83	59	95	112	130

Dentro del análisis realizado con los resultados de la digestión de ácidos, se llevó a cabo una revisión de las concentraciones de referencias totales establecidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 en la cual se establecen los valores límite máximo de ciertos elementos para uso agrícola, residencial y comercial (Tabla 12):

Tabla 12. Concentraciones de referencia totales (CR_T) Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

Contaminante	Uso agrícola (mg/kg)
Ag	390
As	22
Ba	5400
Be	150
Cd	37
Cr	280
Ni	1600
Pb	400
Se	390
TI	5.2
V	78

Donde CR_T: Masa del elemento químico regulado, expresado en mg por unidad de masa del suelo estudiado, expresada en kg, base seca, por encima de la cual se considera existe riesgo de que se genere efectos adversos para la salud.

Comparando los valores de los resultados (Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12), se comprobó que existen dos elementos que sobrepasan el límite máximo permitido por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Son el arsénico (As), en las muestras M09 y M11, del área de Meoqui Delicias, y el vanadio (V), en las muestras M02 y M10, ubicadas en Buenaventura y Meoqui, Delicias, respectivamente. El resto de las muestras parece que están libres de contaminantes de uso agrícola/residencial/comercial.

Los suelos del norte de México y los del suroeste de los Estados Unidos registran altas concentraciones de As de origen natural, es decir el elemento proviene de la degradación de la roca (Albores *et al.* 1997), además, en los acuíferos de México, principalmente en Coahuila, Durango, Hidalgo y Chihuahua se han detectado concentraciones superiores a los límites máximos permisibles para

consumo humano (Vega, 2002). En Chihuahua se han realizado estudios en los municipios de Saucillo, Julimes, Delicias, Meoqui y Rosales, siendo estos últimos 3 donde se han determinado concentraciones en el intervalo de 0.05-0.5 mg/l de arsénico en agua (Ballinas, 2011). Algunos de los autores que han realizado estudios en la zona son Ruiz (2008), Terrazas (2008) y Espino-Valdés *et al.*, (2009), estas investigaciones han determinado que el origen de las altas concentraciones del elemento está estrechamente relacionado con la geología del área.

Además del aporte natural que se presenta en los valles, Alarcón *et al.*, (2012), menciona que las propiedades del arsénico le proporcionan buenas características como insecticida, fungicida, herbicida y plaguicida, además se utiliza como parte de los elementos químicos que componen algunos fertilizantes, esto es debido a la similitud de las propiedades químicas que comparte con el fósforo. Pérez (2015) describe la relación entre el As y la presencia de minería, siderurgia, desechos urbanos, ganadería y agricultura, por otro lado, los combustibles fósiles pueden generar la presencia de este elemento en el suelo causado por la liberación de gases derivados de su combustión (Moreno, 2010).

Por otro lado, el vanadio (V) ocupa el lugar 22 dentro de los elementos más abundantes de la corteza terrestre, con una presencia de 0.014 a 0.02 % (Rodríguez-Mercado & Altamirano-Lozano, 2006), siendo el desgaste de los minerales terrestres los que liberan este elemento en agua y en aire. Entre los minerales que contienen V, se encuentran la vanadinita, carnotita, corvuosita, descloizita, cuprodescolocita, patronita, roscoelita y fernandinita, entre otros menos abundantes que generalmente contienen sales y óxidos de este metal (Baroch, 1983).

En la porción norte del continente americano, se tiene registro de la presencia de depósitos de vanadio; en los esquistos bituminosos, los hidrocarburos, la magnetita titanífera en Wyoming, Nueva York y Minnesota, y los minerales de uranio de bajo grado de Nuevo México (Rose, 1973). El vanadio se encuentra asociado a Molibdeno, Uranio, Talio, Rubidio y Estroncio, como parte de estas asociaciones se tiene documentado la presencia de yacimientos de uranio en la Sierra de Peña Blanca y Sierra de Gómez, en el municipio de Aldama, Chihuahua (Bazán, 1978),

emplazados hidrotermalmente en fracturas, contactos de estratificación y zonas porosas de las calizas del Cretácico inferior, así como en rocas volcánicas de naturaleza riolítica del Oligoceno y Mioceno (Bazán, 1978).

De acuerdo con Rose (1973), el vanadio se encuentra asociado con rocas ígneas máficas (intrusivas y extrusivas), incluidos los tipos que contienen hierro y cobre, complejos de carbonatita, depósitos magnéticos titaníferos, depósitos de cromita, depósitos de uranio, yacimientos de hierro y manganeso, ocurrencias de apatita y fosforita marina, lutitas oscuras, depósitos de arena negra, arenisca y clásticos transportados, ciertas ocurrencias de asfalto, arenisca bituminosa, lignito, carbón, petróleo, pizarra bituminosa y grafito, así como también ocurrencias residuales y secundarias, además se extrae vanadio de rocas sedimentarias del Mesozoico.

Rodríguez-Mercado & Altamirano-Lozano (2006), relacionan la presencia de vanadio con la industria agrícola, en la cual se emplea en la elaboración de fungicidas e insecticidas y como micronutriente en fertilizantes, en la producción de ácido sulfúrico y caucho sintético, además, está relacionado con la actividad industrial, combustión de petróleo, carbón y de aceites pesados, de forma no antropogénica se deriva de las emisiones volcánicas e incendios forestales principalmente (IPCS 2001).

En el caso de las muestras M02 y M10 de Buenaventura y Meoqui Delicias respectivamente, no se tienen registros de la presencia de este elemento en los suelos ni agua (tanto superficial como subterránea). Las cartas geológicas mineras indican que el basamento de la zona está compuesto de rocas sedimentarias, siendo calizas, areniscas y lutitas principalmente, por lo que se propone que su aporte en menor medida proviene de este material, posiblemente también debido a los yacimientos de uranio en la zona, y quizás al uso de fertilizantes, fungicidas e insecticidas.

5.5 Experimentos de columnas y análisis químico

Después de obtener dos litros de lixiviado procedente de la saturación de las columnas de suelo, se enviaron a analizar en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria

de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua 17 muestras, de las cuales 15 fueron de columnas de suelo y 2 de ellas “muestras base” del agua destilada utilizada.

En este laboratorio se analizaron parámetros como pH, Alcalinidad Total, CE y algunos iones mayores como cloruros (Cl^-), Nitratos (NO_3^-), Sulfuros (SO_4^{2-}), Calcio (Ca^{+2}), así como Fluoruros (F^-) en total se analizaron 15 parámetros indicados en la Tabla G31 del Anexo G.

Por otra parte, en el laboratorio del Servicio Geológico Mexicano (SGM) se analizaron 8 muestras (M00, M01, M02, M04, M04B, M09, M10 y M11), en donde además de analizar iones mayores se hizo un análisis de metales, siendo un total de 36 parámetros analizados (Tabla G32, Tabla G33 y Tabla G34 del Anexo G).

Los métodos utilizados para la determinación de los parámetros en el SGM fueron para Fluoruros, Nitratos y Sulfatos en Agua por Espectrometría de UV Visible, el resto de los elementos se analizaron mediante Método por Espectrómetro de Plasma Masas Acoplado Inductivamente (ICP-MS).

En las Tabla 13 y 14 se indican los parámetros más relevantes detectados (indicados en negritas se encuentran los valores que rebasan los límites establecidos), los parámetros mostrados son de ambos laboratorios y se hace la comparación con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 “*Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que deben someterse el agua para su potabilización*”, cabe mencionar que esta comparación es solo para tener un punto de referencia en cuanto a los límites permisibles en México para agua potable.

Tabla 13. Resultados químicos de lixiviados (Parte 1)

ID MUESTRA / PARÁMETRO	Límites	M00	M01	M02	M03	M04	M04B	M05	M06	M07
pH	6.5-8.5	7.6	7.6	7.39	7.7	7.6	7.4	7.54	6.8	7.6
Alcalinidad Total (mg/L)		358.4	112	78.07	86.43	139.41	129.26	33.46	13.94	172.01
CE		1047	488	5590	1818	1622	2190	417	4910	1052
Dureza total	500 mg/L	574.32	104.85	3008.02	1222.01	186.987	845.99	290.81	3853.99	752.01
Bicarbonatos (mg/L)		437.21	136.64	95.24	105.45	120.07	129.26	40.82	17.01	210.83
Ca ⁺² (mg/L)		34.4	18.6	330.9	263.52	14.1	40.9	93.87	1016.42	188.23
K ⁺ (mg/L)		19.4	5.5	17.8	106.4	6.4	14.2	6.81	221.5	155.2
Mg ⁺² (mg/L)		7.6	4.2	82.6	136.96	4.1	24.8	13.7	319.57	68.48
Na ⁺ (mg/L)	200 mg/L	5	30.6	304.6	185.3	106.3	153.4	18.38	757	72.63
Cl ⁻ (mg/L)	250 mg/L	7	9	305	30.42	26	165	4.68	156.76	18.72
NO ₃ ⁻ (mg/L)	44.26 mg/L	<1	12	29	846.09	<1	69	181.91	4638.21	297.66
SO ₄ ⁻² (mg/L)	400 mg/L	18.5	13.7	964	12.4	86.2	170.8	48.84	341.09	95.5
F ⁻ (mg/L)	1.5 mg/L	1.5	3.78	1.49	1.7	1.72	4.22	0.08	1.38	1.25
Fe (mg/L)	0.3 mg/L	0.045	3.979	0.001	<0.10	9.171	<0.001	<0.10	<0.10	<0.10
Al (mg/L)	0.2 mg/L	0.008	4.289	<0.001	-	10.116	0.001	-	-	-
As (mg/L)	0.025 mg/L	0.012	0.002	0.008	-	0.154	0.054	-	-	-
Mn (mg/L)	0.15 mg/L	0.002	0.037	0.001	-	0.080	<0.001	-	-	-
Se (mg/L)	0.05 mg/L**	<0.001	<0.001	0.061	-	0.019	0.034	-	-	-
Sr (mg/L)		0.215	0.096	3.474	-	0.09	0.815	-	-	-
U (mg/L)	0 mg/L**	<0.001	0.001	0.001	-	0.005	0.012	-	-	-
V (mg/L)		0.013	0.015	0.011	-	0.05	0.027	-	-	-

** Tomando de referencia los límites permisibles de la EPA.

Tabla 14. Resultados químicos de lixiviados (Parte 2)

ID MUESTRA / PARÁMETRO	Límites	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M05 SE*	M06 SE*	M07 SE*
pH	6.5-8.5	6.5	7.2	7.5	7.1	7.3	7.2	8.27	8.07	7.86
Alcalinidad Total (mg/L)		5.6	236.99	136.67	78.07	105.98	128.25	344.40	254.80	176.40
CE		1478	2050	1313	2860	1390	2150	-	-	-
Dureza total	500 mg/L	575.81	920.91	658.03	3102	1316	1410.01	-	-	-
Bicarbonatos (mg/L)		6.83	289.13	166.67	95.24	129.26	156.47	413.704	307.268	212.705
Ca ⁺² (mg/L)		183.6	138.1	45.4	613.9	414.1	564.68	58.70	65.88	36.96
K ⁺ (mg/L)		17.11	5.8	0.1	9.3	77.56	56.55	20.37	8.18	19.64
Mg ⁺² (mg/L)		28.5	19	5	270.4	68.48	0	5.74	12	6
Na ⁺ (mg/L)	200 mg/L	38.57	477.8	180.7	210.4	63.72	160.4	83.59	47.18	8.83
Cl ⁻ (mg/L)	250 mg/L	13.1	150	7	42	0	116.99	2.03	1.01	0.51
NO ₃ ⁻ (mg/L)	44.26 mg/L	768.66	81	14	102	80.56	1005.52	-	-	-
SO ₄ ⁻² (mg/L)	400 mg/L	12.4	998	320	2288	376.23	167.44	0.31	49.01	1.28
F ⁻ (mg/L)	1.5 mg/L	0.14	6.56	3.88	6.16	1.47	2.25	1.72	1.30	1.79
Fe (mg/L)	0.3 mg/L	<0.10	0.017	0.003	<0.001	<0.10	<0.10	-	-	-
Al (mg/L)	0.2 mg/L	-	0.014	0.004	<0.001	-	-	-	-	-
As (mg/L)	0.025 mg/L	-	0.130	0.037	0.048	-	-	0.061	<0.01	<0.01
Mn (mg/L)	0.15 mg/L	-	<0.001	<0.001	<0.001	-	-	-	-	-
Se (mg/L)	0.05 mg/L**	-	<0.001	<0.001	<0.001	-	-	-	-	-
Sr (mg/L)		-	1.781	0.599	12.65	-	-	-	-	-
U (mg/L)	0 mg/L**	-	0.009	0.027	0.001	-	-	-	-	-
V (mg/L)		-	0.087	0.048	0017	-	-	-	-	-

*Datos obtenidos de Granillo (2015)

** Tomando de referencia los límites permisibles de la EPA

Parte del análisis realizado con los datos de lixiviación es estudiar la relación entre los datos de lixiviación y la información previa de los pozos muestreados con anterioridad en la zona para algunos parámetros.

En la Tabla 15 se indican las elevaciones del nivel freático (NF), así como los datos de los parámetros de As y F- que se han detectado en el agua subterránea, siendo información recabada de las investigaciones de Chávez (2018), para el acuífero Cuauhtémoc, Bencomo (2013) y Barrera (2008), para Meoqui Delicias y Romero (2019), para el acuífero Buenaventura.

Tabla 15. Relación entre resultados químicos en agua subterránea en pozos (históricos) y lixiviados obtenidos en este proyecto (Nivel Frático, Arsénico y Fluoruros)

Muestra	Elevación del NF (msnm)	Profundidad del NF (m)	Concentración de As pozo (mg/L)	As lixiviado (mg/L)	Concentración de F ⁻ pozo (mg/L)	F ⁻ Lixiviado (mg/L)
M00	2140*	9	Zona no estudiada	0.012	Zona no estudiada	1.5
M01	1452	16.37	0.03	0.002	1.79 - 2.46	3.78
M02	1430*	14	Zona no estudiada	0.008	Zona no estudiada	1.49
M03	1490	39.83	0.026	-	1.75	1.7
M04	1966.567	19.583	0.035 - 0.029	0.154	1 - 1.56	1.72
M04 B	1966.567	19.583	0.035 - 0.029	0.054	1 - 1.56	4.22
M05	1965.6	212.2	0.018	-	3.4	0.08
M06	1980	51.31	0.12	-	2.16	1.38
M07	1936.7	82.21	0.001 - 0.009	-	1.08 - 2.59	1.25
M08	1535.8	556.88	0.029	-	0.64	0.14
M09	-	-	0.068 - 0.092	0.13	2.34 - 3.4	6.56
M10	1170	49.41	0.075	0.037	2.4	3.88
M11	1210	76.95	Zona no estudiada	0.048	Zona no estudiada	6.16
M12	1220*	11.62	0.057	-	1.2	1.47
M13	1100	35.64	0.144 - 0.105	-	2.13 - 1.34	2.25

De acuerdo con datos publicados por Thompson y Troeh (1982), la cantidad de nitratos lixiviada de un suelo dependerá principalmente del régimen de pluviosidad, las características del suelo y sobre todo las cantidades de fertilizante con alto contenido nítrico depositado en el área.

De los datos indicados en la Tabla 13 y Tabla 14, se asume que los altos valores de **nitratos** están estrechamente relacionados con la actividad agrícola de la zona, ya que las muestras fueron tomadas dentro o alrededor de áreas dedicadas a la agricultura, siendo algunas de estas; cultivos de avena, maíz, ciruelos, chile chilaca, frijol, nogales, sandía, entre otros, esta información se muestra en la Tabla 16. Jury *et al.* (1991), menciona que, si hay una fuente de nitrógeno, en este caso los fertilizantes añadidos a los cultivos y un exceso de agua aplicado al suelo, los nitratos tendrán un potencial alto de llegar a los depósitos de agua subterráneas y las corrientes naturales.

Tabla 16. Cultivos comunes por zona de muestreo

Muestra	Cultivo de la zona	Acuífero
M01	Nogales	Alta Babícora
M02	Nogales	Buenaventura
M03	Chile chilaca	Buenaventura
M04	Avena	Buenaventura
M04 B	Avena	Cuauhtémoc
M05	Frijol	Cuauhtémoc
M06	Maíz	Cuauhtémoc
M07	Ciruelos	Cuauhtémoc
M08	Maíz/alfalfa	Cuauhtémoc
M09	Melón	Cuauhtémoc
M10	Maíz	Meoqui-Delicias
M11	Rotativo - Maíz	Meoqui-Delicias
M12	Nogales	Meoqui-Delicias
M13	Sandía	Meoqui-Delicias

Por otra parte, el **sodio** es el elemento del grupo de los metales alcalinos más abundante de la corteza terrestre, con un promedio de 24 kg/t, está relacionado con rocas evaporíticas y rocas ígneas félsicas (Ramírez y San José, 2010). Como tal el sodio no se encuentra como un mineral nativo, debido a las características del elemento, si se encontrara de manera pura expuesto al ambiente se oxidaría, tampoco se encuentra entre los hidróxidos, óxidos y sulfuros, comúnmente se

presenta entre los halogenuros y silicatos, encontrándose también entre los carbonatos, nitratos y sulfatos (Ramírez y San José, 2010).

Durante el proceso de evapotranspiración, al aumentar la concentración las sales menos solubles se precipitan, quedando en su mayoría una fracción de las más solubles como el sodio depositado en la primera capa del suelo (Can-Chulim *et al.*, 2011). Las concentraciones elevadas de este elemento se relacionan con la disociación iónica en el agua de elementos con alto contenido de sodio, normalmente se encuentran asociados al cloro, bicarbonato y sulfato (Ramírez y San José, 2010). En el caso del agua subterránea la concentración dependerá en gran medida de la disponibilidad del elemento en el medio, así como la temperatura, la presión, el tiempo y la distancia recorrida por el agua y la solubilidad de minerales sódicos (Ramírez y San José, 2010).

Tomando en cuenta la información anterior y de acuerdo con las cartas geológicas de las zonas de estudio, rodeando los valles donde se encuentra localizadas las Muestras M02, M06, M09 y M11, que son las muestras con concentraciones de sodio mayores, se tiene como litología dominante tobas félsicas y riolitas, las cuales presentan como se mencionó anteriormente minerales ricos en este elemento, por lo que se relaciona la presencia de sodio a la geología de la zona. Por otra parte, es sabido que el intercambio catiónico es un proceso que se lleva a cabo en los suelos donde los principales cambiadores son las arcillas y la materia orgánica, entre los cationes que frecuentemente realizan intercambios en los suelos son: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+ , Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , NH_4^+ , Mn^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+} (Soto, 2016).

Además del sodio, se tienen resultados altos en **sulfatos** para las muestras M02, M09 y M11, así como de cloruros en la muestra M02. Los sulfatos son un grupo mineral cuya unidad estructural fundamental son el ión $(\text{SO}_4)^{-2}$ enlazado entre sí por cationes de aluminio, sodio, calcio, potasio, magnesio y hierro. Son comunes en minerales de la corteza terrestre, entre los más comunes destacan la anhidrita, barita y el yeso (Moreno *et al.*, sf). Las concentraciones altas se relacionan también a la quema de combustible fósil, así como el uso de fertilizantes, ya que el azufre forma parte de los componentes en mayor o menor medida (Fetter *et al.*, 2018).

Por otro lado, Franklin *et al.* (1985) describió que las concentraciones de sulfato en lluvia en el año 1980 oscilaban entre 1,0 y 3,8 mg/L, mientras que para el 2007 se ha notificado un valor medio anual de alrededor de 6 mg/L en precipitación sobre Europa central (OMS, 2007; Bolaños-Alfaro, *et al.*, 2017). Además, los niveles de sulfato en agua de lluvia y agua superficial se correlacionan con las emisiones de dióxido de azufre ocasionadas por la actividad humana (Keller y Pitblade, 1986), principalmente provenientes de motores que utilizan como combustible diésel.

A pesar de ser minerales relativamente comunes, la presencia de sulfatos en el suelo no es muy frecuente por su facilidad de lavado, puesto que son compuestos de solubilidad relativamente alta, su acumulación efectiva solo puede producirse bajo condiciones muy determinadas: abundancia de sulfatos en el entorno inmediato y clima árido o semiárido (Moreno *et al.*, *sf*). Como parte de las investigaciones relacionados con este punto algunos autores como Velásquez (1996), Steinich *et al.* (1996), Villasuso y Méndez (2000), han determinado que su origen está asociado con la disolución de las rocas evaporíticas, además, como se describió con anterioridad al ser una zona árida donde la mayor parte del año existe una mayor evaporación que precipitación, el balance indica que el suelo tiene un déficit de humedad (Graniel *et al.*, 2009). Por esta razón, se cree que la presencia de sulfatos en las muestras M02, M09 y M11 está relacionada con las altas tasas de evaporación de la región, las muestras 02 y 11 no cuenta con información de calidad de agua subterránea de la zona, pero la muestra 09 cuenta con registros de pozos cercanos donde los valores de este ion van de 480 a 920 mg/L (Barrera, 2008), por lo que también se infiere la relación con el medio geológico.

Por otro lado, el ion **cloruro** se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza, comúnmente se encuentra en forma de sales de sodio (NaCl), de potasio (KCl) y de calcio (CaCl₂), su origen natural se relaciona a la meteorización de las rocas, aunque las entradas de sales de polución e intrusión marina son importantes en ciertas localidades puntuales, de manera antropogénica se relaciona con descargas de efluentes de las industrias químicas, explotación de pozos petrolíferos, descargas de aguas servidas o drenaje de irrigaciones (Tenorio y Fuentes, 2014).

Fetter *et al.*, (2018) menciona que algunos fertilizantes comerciales pueden contener KCl, aunque además de esto, en la zona donde se recolectó la muestra (M02), se observa un aspecto árido, los suelos son claros y se distingue una capa blanquecina sobre algunos puntos, varios agricultores de la zona mencionaron que el área es salobre, cabe destacar que en la zona no se tiene registro de estudios, y tampoco información pública de la calidad del agua subterránea. Se considera que existe relación entre la alta concentración de sodio y de cloruros en esta zona.

Otro de los elementos que presentaron altas concentraciones en el lixiviado es el **hierro** (Muestras M01, M04 y M09), éste es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre, se encuentra en los estados bivalente y trivalente (ferroso y férrico) y su presencia en el agua puede ser consecuencia de la disolución de rocas y minerales, del drenaje ácido de las minas, de lixiviaciones en rellenos, de sistemas de alcantarillados o industrias que elaboran hierro (Rodier, 1981; OPS, 1987).

Es uno de los elementos más frecuentes en las rocas y en los suelos agrícolas, las fuentes naturales principales del hierro en los suelos las constituyen diversos minerales primarios ferromagnesianos, como lo son los piroxenos, anfíboles, algunas variedades de granate, epidota, filosilicatos como biotitas y olivino (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2004). Los óxidos de hierro son los óxidos metálicos más abundantes en el suelo (Schwertmann y Taylor, 1989),

Olmedo (1971), hace hincapié en los diagramas de solubilidad los cuales muestran que el hierro es un elemento que se moviliza en el suelo en uno u otro estado de valencia, lo que lo hace apropiado para dar paso a la alteración de las rocas y la evolución química del suelo. La solubilidad del hierro dependerá en gran medida de distintos factores entre los que están los procesos hidrolíticos, la concentración y disolución de los oxihidróxidos de Fe (III), el estado de valencia y del potencial redox, la solubilidad del hierro puede ser afectada por la formación de otros compuestos de hierro, como: sulfatos, sulfuros y carbonatos (Murad y Fischer, 1985; Schwertmann, 1990).

La muestra M01 al igual que la muestra M04 presentan una coloración del suelo marrón (alto contenido orgánico); se sabe que el agua subterránea a diferencia del agua superficial tiene mayores concentraciones de hierro ya que la

materia orgánica del suelo absorbe el oxígeno disuelto del agua, normalmente las aguas con gran carga orgánica suelen tener más Fe (Gallegos *et al.*, 2005).

Se cree que la presencia de este elemento está estrechamente relacionada con la geología del área y la erosión del material circundante, la composición de las sierras aledañas es principalmente de tobas, riolitas y basaltos, así como al alto contenido de materia orgánica.

Otro de los elementos con alto contenido es el **aluminio**, este es el tercer elemento más abundante de la corteza terrestre (8 %), después del silicio (27,7 %) y el oxígeno (46,6 %) y se encuentra en el medio natural en la forma de la especie iónica Al^{3+} (Torrellas, 2013). De manera natural el aluminio se encuentra combinado con elementos como el oxígeno, el flúor y el silicio, formando así minerales (Cotton y Wilkinson, 1989), entre los minerales y rocas se encuentra en aluminosilicatos (feldespatos, imogolita, caolinita), fosfatos (variscita), sulfatos (jurbanita) e hidróxidos (gibbsita) (Soon, 1993).

Como se mencionó anteriormente existen procesos de intercambio iónico así como asociaciones entre ciertos elementos, tal es el caso del aluminio y el hierro, los cuales están presentes y en altas concentraciones en las muestras M01 y M04, de acuerdo con Ségalen (1973), estos elementos suelen encontrarse casi siempre juntos, debido a que la dimensión y la carga de Fe^{3+} y Al^{3+} permiten el remplazo entre ellos en ciertas estructuras, además, existen minerales donde coexisten estos elementos como en los grupos de anfíboles, piroxenos y micas. La presencia de aluminio en algunas estructuras en lugar de sílice genera una deficiencia en las cargas y se compensa con algunos iones que pueden ser de potasio, sodio o calcio (Ségalen, 1973).

La estructura del suelo es un factor importante en la disponibilidad del aluminio, los agregados arcillosos impiden a los protones H^+ alcanzar los sitios de adsorción, lo que disminuye la tasa de liberación (Torrellas, 2013). Un gran porcentaje de este ion proviene del intercambio de aluminio unido a superficies específicas del suelo por fuerzas electrostáticas (Abreu *et al.*, 2003).

Aunque la solubilidad del aluminio en agua es muy baja, la acidificación del suelo aumenta la lixiviación del aluminio presente en los sedimentos a los cuerpos

de agua subterráneos (Reuss & Johnson, 1986). Por esta razón, se considera que se tiene una mayor concentración de este elemento, como se mencionó anteriormente en estas muestras se observaba un alto contenido de materia orgánica, por lo que se puede relacionar con la producción de ácido húmico y por ende una acidificación en el sedimento.

De los estudios relacionados con las concentraciones elevadas de **selenio** en el agua, ya sea en selenato o selenito, se ha identificado que su aporte se origina de manera natural a partir de depósitos atmosféricos o por la erosión de las rocas, en mayor concentración de las rocas sedimentarias y lutitas formadas durante el período cretácico; o antropogénica, debido a la suplementación de tierras agrícolas con fertilizantes que contienen selenio provocando con el drenaje del suelo y subsuelos concentraciones elevadas (Ruíz, 2017; Mehdi *et al.*, 2013). En aguas superficiales predominan el seleniuro y el selenato de sodio (Molina, 2019).

Las concentraciones de este elemento en los suelos varían en función del tipo y la textura del suelo, el contenido de materia orgánica y sobre todo de las precipitaciones, el contenido de selenio en la mayoría de los suelos oscila entre 0.1 a 0.7 mg/kg (Molina, 2019). Las formas en las que se encuentra el selenio en el suelo dependerán en gran parte de la acidez de este y de la interacción con oxígeno, los compuestos de selenio que pueden disolverse en agua son a veces muy móviles, de esta manera, la probabilidad de exposición a estos compuestos es más alta (Molina, 2019).

La muestra M02 se encuentra localizada en la zona centro norte del acuífero Buenaventura, de acuerdo con la carta geológica no se tienen rocas sedimentarias cerca del área, pero no se descarta una pequeña aportación proveniente de rocas ígneas y de fertilizante, posiblemente se tenga presencia de selenato de sodio, ya que se tiene registro de alto contenido de sodio en la zona.

El **arsénico** y el **flúor** son elementos que se han considerado importantes contaminantes debido a sus altas concentraciones en el agua de consumo a nivel mundial (Hug *et al.*, 2020; Podgorski y Berg, 2020; Shaji *et al.*, 2021).

México es uno de los países que ha documentado la presencia de altos niveles de arsénico y flúor en el agua subterránea, en especial en la zona norte del

país y regiones geotermales (Armienta y Segovia, 2008; Alarcón-Herrera *et al.*, 2020; Bundschuh *et al.*, 2020), como se mencionó en el capítulo 5.4, Chihuahua es uno de los estados en los que se han registrado datos de arsénico en concentraciones mayores a las permitidas de acuerdo con la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994, además de ese elemento se cuentan con altas concentraciones de flúor, este está ampliamente distribuido en el estado, dentro de los acuíferos estudiados se encuentran Jimenez- Camargo (González-Horta *et al.*, 2015), Aldama - San Diego, Laguna de Hormigas (Gutiérrez *et al.*, 2017) y Meoqui-Delicias (Barrera, 2008; Rascón, 2011; Espino-Valdés *et al.*, 2009).

Entre los estudios realizados, existe concordancia con el origen de estos elementos, se describe que su origen es geogénico (Reyes-Gómez *et al.*, 2013; Alarcón-Herrera *et al.*, 2020), por lo que la fuente está ligada a la geología y mineralogía del área, se ha comentado que existe relación entre el origen geogénico de As y cuencas de país, la presencia de rocas volcánicas ricas en sílice y acuíferos granulares, donde la depresión se rellenó con material aluvial de edad geológica reciente (Gutierrez *et al.*, 2021), este material de relleno es un material granular que se genera de la erosión e intemperismo de las rocas circundantes en un proceso que toma de miles a millones de años (Reyes – Cortés *et al.*, 2014).

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

Actualmente, se cuenta con información limitada de las características del suelo y su comportamiento con respecto a la saturación del material superficial en el estado de Chihuahua. El presente trabajo es el primero realizado con el interés centrado en la caracterización fisicoquímica y mediante experimentos de lixiviación de suelos agrícolas, a fin de determinar su comportamiento y posibilidad de interacción con el agua que se infiltra en estos suelos.

De antemano se admite que el número de muestras tomadas y analizadas, no son representativas de los acuíferos estudiados, ni pueden ser utilizados para pretender explicar de una forma global los procesos que actúan en ellos, sin embargo, son el primer esfuerzo exploratorio dentro de un plan a mediano y largo plazo, a fin de caracterizar la interacción del medio sedimentario granular con el agua que se infiltra en ellos, pues típicamente solo se evalúa la composición del agua en los acuíferos, y se soslaya la posible interacción con el medio geológico.

El diseño experimental consistió en rellenar las columnas con el material recolectado en los puntos ya descritos, buscando reproducir las condiciones de campo en cuanto a la infiltración, por este motivo hubo muestras que tomaron desde un par de horas hasta varios días para saturarse y obtener el efluente. Del mismo modo ocurrió con las muestras de permeabilidad en el laboratorio, en donde se tuvieron resultados que van de 3×10^{-6} hasta 3×10^{-3} cm/s, siendo las de mayor contenido de finos las menos permeables y la muestra base compuesta principalmente de arena la más permeable.

Por otra parte, el análisis óptico del material permitió determinar que el 67% de las muestras se encuentran mal clasificadas, así como el 60% del material se considera inmaduro texturalmente y mineralógicamente inmaduro a submaduro, lo cual puede interpretarse como una baja distancia en cuanto a transporte, por lo que el suelo es relativamente joven y se tiene el aporte de las sierras circundantes.

El proceso de lixiviación ocurre de manera natural en los sistemas hidrogeológicos, pero puede llegar a ser perjudicial con las prácticas agrícolas; sobre todo al sufrir la injerencia humana mediante su fertilización, uso de plaguicidas, herbicidas y pesticidas. Esto es debido a que al depositarse el material

y tener la presencia de lluvia, el agua además de disolver los compuestos naturales favorecerá las reacciones químicas con el entorno circundante y, con el tiempo, será el medio de transporte de ciertos elementos para que lleguen a depósitos de agua subterráneos.

Estos experimentos simples de lixiviación en los que no se tomaron en cuenta las variables como pH, temperatura y tipo de vegetación/cultivo, permitieron descubrir que la lixiviación simple “lavó” compuestos y/o elementos que, naturalmente o debido a acciones humanas, se encuentran en los suelos.

Entre los elementos que se detectaron durante el análisis de los lixiviados y que confirma la información previa (en **Meoqui**, Delicias) se obtuvieron valores fuera de la norma de referencia (de agua potable) en los F^- y As, así como también en NO_3^- , SO_4^{2-} y Na^+ , este último localizado en la porción norte. Para la zona de **Cauhtémoc** se registraron datos en NO_3^- , F^- y As, así como Fierro y Aluminio al este de la Laguna de Bustillos y Na^+ en la parte noroeste del acuífero. Para el área de **Buenaventura**, solo se tomaron 3 muestras, pero se obtuvieron valores elevados en F^- para las 3 muestras, así como Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} y Selenio en la parte norte, así como Fierro y Aluminio en la parte central. Con estos experimentos se comprueba que los elementos que aparecen en los lixiviados son móviles y solubles en agua.

Adicional a las concentraciones en el efluente recolectado por cada columna, se detectó la presencia de Arsénico y Selenio por encima de la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 la cual establece los límites para uso agrícola en la parte sólida del suelo, estos altos resultados se registraron en 4 de las muestras analizadas a través de digestión de ácidos, dentro de las áreas de Meoqui Delicias y Buenaventura.

La presencia de estos elementos que aparentemente son liberados de la matriz mediante reacciones de intercambio iónico o simple desadsorción, pueden alcanzar ciertos niveles y generar una problemática ambiental al presentarse en niveles elevados en el agua subterránea, es bien conocido que el estado de Chihuahua, debido a sus condiciones climáticas y permanente sequía, depende en gran medida de la extracción de agua subterránea para el abastecimiento de las actividades económicas y el consumo humano.

Para evitar problemas de contaminación es necesario conocer el comportamiento del medio para diseñar estrategias de manejo de residuos y elementos químicos que puedan alcanzar los mantos freáticos.

Por esta razón, se recomienda llevar a cabo un muestreo sistemático de las áreas donde se tenga conocimiento de las altas concentraciones de ciertos elementos en el agua subterránea (en una primera etapa), tanto en mayor número de muestras así como a diferentes profundidades para comparar el comportamiento de los iones/elementos, así como también llevar a cabo más experimentos de lixiviación tomando en cuenta los diversos parámetros que en esta investigación no se utilizaron, es decir, realizar variaciones en la temperatura, en el pH del agua utilizada, tiempos de saturación, entre otros. Con esta información se podría generar una base de datos que permita relacionar la calidad del agua con la composición de los suelos, y a su vez, generar modelos de transporte para los distintos contaminantes.

Capítulo 7. Bibliografía

- Abreu Jr., C. H., Muraoka, T. & Lavorante, A. F. (2003). *Ex- changeable Aluminum Evaluation in Acid Soils*. Scientia Agricola, 60 (3), 543-548.
- Acevedo-Sandoval, O., Ortiz-Hernández, E., Cruz-Sánchez, M., Cruz-Chávez, E., (2004). *El papel de óxidos de hierro en suelos*. Terra Latinoamericana, vol. 22, núm. 4, pp. 485-497 Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.
- Adams, A. E., W. S. MacKenzie, et al. (1997). *Atlas de rocas sedimentarias*. Masson.
- Alarcón, M. T., Llorens, E. y Poch, M. (2012). *Remoción de Arsénico en Agua de Consumo Humano en Latinoamérica*. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, México.
- Alarcón-Herrera, M.T., Martín – Alarcón, D. A., Gutiérrez, M., Reynoso-Cuevas, L., Martín-Domínguez, A., Olmos, M. A., and Bundschuh, J. (2020). *Co - occurrence, Possible origin, and health – risk assessment of arsenic and fluoride in drinking water sources in Mexico: Geographical data visualization*. Sci. Total Environ. 698, 1234168
- Alatorre, L., Díaz, R., Miramontes, S., Bravo, L. & Sánchez, E. (2014) *Spatial and Temporal Evolution of the Static Water Level of the Cuauhtémoc Aquifer during the years 1973, 1991 and 2000: a Geographical Approach*. Journal of Geographic Information System, 6(5), 572-584.
- Albores, A., Quintanilla, B., Del Razo, L. y Cebrian, M., (1997). *Arsénico*. En: Anónimo (eds) *Introducción a la Toxicología ambiental*. OPS, OMS, CPEHSPA. Metepec: 247-261.
- Albrecht, A y Goldstein, S. L. (2000). *Efectos de la composición y la edad del sótano en los magmas silícicos a través de un límite de corteza precámbrica-terreno acretado, Sierra Madre Occidental, México*. Journal of South American Earth Sciences, 13, 255-273.
- Álvarez, M. D. (2010). *El suelo, regulador físicoquímico de elementos traza para las plantas*. En J. L. González Rebollar & A. Chueca Sancho (Eds.). *Características generales y uso en programas de desarrollo de tierras áridas y semiáridas: Homenaje al Dr. Julio López Gorgé* (pp. 129-142). Granada: Consejo Superior de Investigaciones Científicas
- Angelone, S., Garibay, M. T. y Cauhapé, M., (2006). *Permeabilidad de Suelos*. Universidad Nacional de Rosario.
- Aranda, G. (1980). *Estudio Geológico de los Yacimientos Minerales de Naica, Chihuahua*. Trabajo de titulación, Universidad Autónoma de San Luis Potosí
- Arandia, A. D., (2018). *Caracterización petrofísica y sedimentológica de las arenas del mioceno temprano como potencial gasífero presentes en la Cuenca de la Guajira, Campo Chuchupa en el área de influencia del Pozo “C1”*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Facultad Seccional Sogamoso Escuela de Ingeniería Geológica Sogamoso, Boyacá.

- Armienta, M.A., N. Segovia. (2008). *Arsenic and fluoride in the groundwater of Mexico*. Environ. Geochem. Health 30, 345-353.
- Bal, W. y Kasprzak K.S. (2002). *Induction of oxidative DNA damage by carcinogenic metals*. Toxicol. Lett. 127, 55-62.
- Ballinas, M. L. (2011). *Estudios de caracterización del agua de pozo de consumo humano en el Estado de Chihuahua*. Ciencia Tecnología e Innovación.
- Baroch, E.F. (1983). *Vanadium and vanadium alloys*. En: Encyclopaedia of chemical technology. Wiley, Nueva York, pp. 673-710.
- Barrera, Y. (2008). *Estudio hidrogeoquímico y de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Meoqui Delicias del estado de Chihuahua*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería. Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Bazán, S. (1978). *Génesis y Depositación de los Yacimientos de Molibdeno y Uranio, en el Distrito de Villa Aldama, Chihuahua*. Bol. Soc. Geol. Mexicana, Tomo XXXIX, No. 2, pp 25-33.
- Benavides, A., Moreno, M., Sosa, M., Puga, S., Alcalá, J. y Quintana C., (2008). *Evaluación de la Calidad del Agua en las Principales Lagunas del Estado de Chihuahua*. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, 4 (2):84 -88, 2008.
- Bencomo, M. (2013). *Comportamiento del arsénico mediante un modelo hidrogeoquímico en el Acuífero Meoqui-Delicias*. Tesis para obtener el Grado de Maestro en Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua, México.
- Boggs, S., (1987). *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*. ISBN 0675204879, 9780675204873
- Bolaños-Alfaro, J; Cordero-Castro, G; Segura-Araya, G. *Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica)*. Tecnología en Marcha. Vol. 30-4. Octubre-diciembre 2017. Pág. 15-27.
- Borselli, L., (2017). *Geotecnia I. Parte II, Clasificación ingenieril de los suelos y de los macizos rocosos*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Brady, N. C, & Weil, R. (2002). *The nature and properties of soils*. Thirteenth Edition. Prentice Hall, New Jersey. USA. Pp. 960.
- Bundschuh, J., Armienta, M. A., Morales-Simfors, N., Alam, M. A., López, D. L., Delgado-Quezada, D., Dietrich, S., Schneider, J., Tapia, J. and Sracek, O. (2020). *Arsenic in Latin America: new finding son source, mobilization, and mobility in human environments in 20 countries based on decadal research 2010-2020*. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 51(16), 1727–1865.
- Burrous, R.H. (1909). *Geology of Northern Mexico*. Bol. Sociedad Geológica Mexicana
- B@UNAM, (sf). *Composición física y química del suelo agrícola*. Consultado el 10 de noviembre del 2022 en la liga: http://uapas1.bunam.unam.mx/ciencias/composicion_de_suelos/
- Cameron, K. L., Nimz ,G. J., Kuentz, D., Niemeyer, S and Gunn, S. (1989). *Southern Cordilleran basaltic andesite suite, Southern Chihuahua, México*. a link between

- Tertiary continental arc and flood basaltic magmatism in North America, *Journal of geophysical Research*, V. 94, pp. 7817-7840.
- Can-Chulim, Á., Ortega-Escobar, H. M., García-Calderón, N. E., Reyes-Ortigoza, A. M., González-Hernández, V. A., Flores-Román, D. (2011). *Origen y calidad del agua subterránea en la cuenca oriental de México*. Terra Latinoamericana, vol. 29, núm. 2, abril-junio, pp. 189-200 Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.
- Candela, L., Fabregat, S., Solé M. y Rodríguez R. L. (2003). *Estudios cinéticos de transporte del herbicida 2,4-D en columnas de laboratorio*. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VI. J. Álvarez-Benedí y P. Marinero, 105.
- Carta Geológica Minera Buenaventura H13-7, CRM (1991). Escala 1:250,000
- Cervantes, I.D. (2018). *Caracterización química de sedimentos de Laguna de Encinillas, Chih., Méx.* Tesis de Licenciatura de la Universidad Autónoma de Chihuahua, México.
- Chávez, I.I., (2018). *Caracterización hidrogeoquímica del Acuífero Cuauhtémoc ubicado en el municipio Cuauhtémoc, Chihuahua, México*. Tesis presentada para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología Subterránea en la Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Chopra, I., Kumari, B. and Sharma, S.K. (2010). *Evaluation of leaching behavior of pendimethalin insandy loam soil*. Environmental Monitoring and Assessment. 160(1-4): p. 123-126.
- Christoffoleti, P.J. (2005). *Dinâmica dos herbicidas aplicados ao solo na cultura de cañade-açúcar*. 1 ed., São Paulo: Divisão de Biblioteca e documentação-ESALQ/USP.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], (1996). *Simulación Hidrodinámica Y Diseño Optimo*
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], (2005). *Actualización del Estudio geohidrológico del Acuífero Meoqui-Delicias, Chihuahua*.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], (2009). *Actualización Geohidrológica de los acuíferos Las Palmas, Palomas-Guadalupe-Victoria, Los Moscos, Josefa Ortiz de Domínguez, El Sauz-Encinillas, Laguna El Diablo, Laguna La Vieja, y Chihuahua- Sacramento, en el estado de Chihuahua*.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], (2010). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero El Sauz-Encinillas (0807), Estado de Chihuahua*.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], (2013). *Plan de manejo integrado del Acuífero Cuauhtémoc, Estado de chihuahua*.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], (2018) b. *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero El Sauz-Encinillas (0807), Estado de Chihuahua*.

- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], (2018). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuauhtémoc (0805), Estado de Chihuahua.*
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], (2020) b. *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero El Sauz-Encinillas (0807), Estado de Chihuahua.*
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el Acuífero Buenaventura (0804). Estado de Chihuahua.*
- Comisión Nacional del Agua y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], (2005). *Estadística del Agua en México.* CONAGUA y SEMARNAT, México.
- Connell, D. W. (1997). *Basic concepts in environmental chemistry.* Lewis Publishers, N. Y. USA. pp. 506.
- Consultores en Agua Subterránea, S.A. (2000). *Capítulo III, Modelo Geológico Conceptual. Documento: Acuífero Cuauhtémoc, Proporcionado por Comisión Nacional del Agua (2020).*
- Costa, J.L., Knighton, R.E. and Prunty, L. (1994). *Model Comparison of Unsaturated Steady-State Solute Transport in a Field Plot.* Soil Sci. Soc. Am. J.. 58(5): p. 1277-1287.
- Cotton, F. A. & Wilkinson, G. (1989). *Advanced Inorganic Chemistry.* New York, NY: Oxford University Press.
- Delgado, M., Rivera, Y., Torres, J., Corral, A. Y., Flores, J. y Santana L. E., (2014). *Determinación de cadmio, cromo, plomo y arsénico en suelos superficiales urbanos de Ciudad Juárez, Chihuahua, México.* CULCyT, Medio Ambiente. Año 11, No 54 Especial No 1. Pp. 189 -207
- Diario Oficial de la Federación (2015). *Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del Acuífero El Sauz-Encinillas, Clave 0807, en el Estado de Chihuahua, Región Hidrológico-Administrativa Río Bravo.*
- Doran, J.W. y Parkin, B.T. (1994). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment.* Soil Science Society of America, Inc. Special Publication. Number 35. Madison, Wisconsin, USA.
- Erdem, M. y Özverdi, A. (2008). *Leaching behavior of chromium in Chrome shaving generated in tanning process and its stabilization.* Journal of Hazardous Materials. Vol. 156, pp. 51-55.
- Espino-Valdés, M.S., Barrera-Prieto, Y., y Herrera-Peraza, E. (2009). *Presencia del arsénico en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias, del estado de Chihuahua, México.* Tecnociencia Chihuahua 3:8–18.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) (2015). *Propiedades Físicas del Suelo.* Consultado el día 15 de febrero del 2022

- en el link <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- FAO [FAO, ISRIC y SICS] (1999). *Base referencial Mundial del Recurso Suelo*. M-51 ISBN 92-5-304141-2
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S. (2005). *Magmatismo y tectónica de la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, LVII (3), 343-378.
- Ferrari, L.A. (2018). *Lixiviación de fosfatos y nitratos a partir de fertilizantes inorgánicos y orgánicos bajo lluvia simulada*. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.
- Fetter, C. W., Boving, T. & Kreamer, D. (2018). *Contaminant Hydrogeology*. Third Edition. United States of America. ISBN 1-4786-3279-8
- Franklin, C. A. Franklin, Burnett, R. T., Paolini, R. and Raizenne, M. E. (1985). *Health risks from acid rain: a Canadian perspective*. Environmental Health Perspectives, vol. 63, pp. 155-168.
- Gallegos, R., Navas, H., Arteaga, G., Troya, E. y Dávalos M. E. (2005). *Agua Potable. Requisitos*. Consultado en el enlace <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/754/1/ti881.pdf> el 22 de febrero del 2022.
- García, E. (1964). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. D.F. México.
- García, E., (1990). *Climas, 1: 4000 000. Atlas Nacional de México*. Vol. II. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- González-Horta, C., Ballinas-Casarrubias, L., Sánchez-Ramírez, L. B., Ishida, M. C., Barrera-Hernández, A., Gutiérrez-Torres, D. Zacarías, O. L., Saunders, R. J., Drobná, Z. and Méndez, M. A. (2015). *A concurrent exposure to arsenic and fluoride from drinking water in Chihuahua, Mexico*. Int. J. Environ. Res. Public Health, 12, 4587-4601.
- Grael, E., Pacheco, A. y Coronado, V. (2009). *Origen de los sulfatos en el agua subterránea del sur de la sierrita de Ticul, Yucatán*. Ingeniería 13-1. Pp. 49-58
- Granillo, E. (2015). *Caracterización de sedimentos en columnas de suelo para identificar minerales contaminantes, en porción norte de Laguna de Encinillas, Chihuahua, México*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Gutiérrez, M., Espino-Valdés, M. S., Alarcón-Herrera, M. T., Pinales-Munguía, A. y Silva-Hidalgo, H. (2021). *Arsénico y flúor en agua subterránea de Chihuahua: origen, enriquecimiento y tratamientos posibles*. Tecnociencia Chihuahua. Vol. XV (2): pág. 95–108
- Gutiérrez, M., Reyes-Gómez, V. M, Núñez-López, D. and Alarcón-Herrera, M. T. (2017). *Monitoreo hidrológico y de calidad de agua entre acuíferos del centro del estado de Chihuahua, En: Cuenca del Rio Conchos: Una mirada desde las*

- ciencias ante el cambio climático*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, pp. 205-223. ISBN978-607-9368-90-0.
- Haenggi, W. (2007). *Tectonic history of the Chihuahua trough, Mexico and adjacent USA, part 2: Mesozoic and Cenozoic*. Sociedad
- Hartwig A. (1995). *Current aspects in metal genotoxicity*. *Biometals* 8, 3-11
- Huertas, J.A. (2014). *Lixiviación en columna de suelo de los herbicidas metsulfurón metilo y 2,4-D en suelos arroceros de los municipios de Espinal y Prado (Tolima)*. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Departamento de Químicas.
- Huertos, E. M. y Romero, A. B. (2008) Conferencia: *Contaminación de suelos por metales pesados*. (macla. nº 10. noviembre-08) Universidad de Sevilla. España. 22 p.
- Hug, S. J., Winkel, L. H. E., Voegelin, A., Berg, M. and Johnson, A. C. (2020). *Arsenic and other geogenic contaminants in groundwater – a global challenge*. *Chimia*, 74, 7/8.
- IARC (International Agency for Research on Cancer) (2006). *Monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans. Cobalt in hard-metals and cobalt sulfate, 188 gallium arsenide, indium phosphide and vanadium pentoxide*. Lyon, Vol. 86.
- INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía México] (2003). *Síntesis de Información geográfica del estado de Chihuahua*.
- INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía México] (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010*. Cuauhtémoc, Chihuahua.
- INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía México] (2013). Carta Edafológica Escala 1:250,000 Serie II
- INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía México] (2014). *Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250,000: serie V*, 195 p.
- INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía México] (2017). *Guía para la interpretación de cartografía. Uso de suelo y vegetación*. Aguascalientes.
- IPCS [International Programme on Chemical Safety] (2001). *Vanadium pentoxide and other inorganic vanadium compounds*. World Health Organisation, Ginebra, No. 29.
- Jordán, A., (2006). *Manual de edafología*. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla. p. 28 - 24
- Jury, William, Wilford Gardner, and Walter Gardner (1991). *Soil physics*. 5th ed. John Wiley and Sons.
- Keller, W. y Pitblade, J.R. (1986). *Water quality changes in Sudbury area lakes: a comparison of synoptic surveys in 1974-1976 and in 1981-1983*, *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 29, pp.285.
- Kurniawan, T. A., W.-h. Lo y G. Y. S. Chan (2006). *Physico-chemical Treatments for Removal of Recalcitrant Contaminants from Landfill Leachate*. *Journal of Hazardous Materials B129*: 80-100.

- Leeder, M. (1999). *Sedimentology and Sedimentary Basins: from turbulence to tectonics*. Blackwell Science. Oxford.
- Lindbo, D. L., Kozlowski, D. A., & Robinson, C. (2012). *Know soil, know life*. Madison, WI: Soil Science Society of America.
- López, M. G. & Pérez, A., (2018). *Pruebas de lixiviación como evaluación ambiental de materiales*. Publicación Técnica No. 515, Sanfandila, Qro, ISSN 0188-7297.
- Martínez, M. J. (2005). *Persistencia y comportamiento de herbicidas en suelos de olivar: Simazina y terbutilazina*, in *Química Agrícola y Edafología*. Universidad de Córdoba: Córdoba. p. 317.
- Martínez, M. J., Aldana, M. I., Guerrero J. A. (2015). *Modelación matemática del transporte de oxadixyl en suelos de cultivo de cebolla*. Revista Ambiente y Agua, Vol.10, No.2. Bogotá, Colombia.
- Martínez, P. (2001). *Relación del Arsénico con el Sistema Hidrogeológico Regional en el Área de Delicias, Chihuahua*. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Mehdi, Y., Hornick, J. L., Istasse, L., Dufrasne, I., Mehdi, Y. and Hornick, J. L. (2013). *Selenium in the Environment, Metabolism, and Involvement in Body Functions*. *Molecules*; 18(3):3292–311. Disponible en: <http://www.mdpi.com/1420-3049/18/3/3292>
- Mendoza-Palacios, J.D., Cristóbal-Acevedo, D., Brito Manzano, N., Vázquez, A., Bakhlaeva-Egorova, O., Botello, M.A., Nikolskii, L. & De la Cruz Lázaro, E. (2007). *Lixiviación de nitrógeno inorgánico en un suelo agrícola bajo diferentes tipos de drenaje en el trópico húmedo*. *Universidad y Ciencia*. 23. 1-14.
- Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, (2000). *Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que se debe someterse el agua para su potabilización*. Secretaría de Salud. México, D.F.
- Molina, A. E. (2019). *Selenio: un elemento tóxico y esencial*. Trabajo de grado. Universidad Complutense. Páginas 5-6.
- Montoya, M. I. (2008). *Modelación Matemática del Transporte y Transformaciones del Nitrógeno Procedente de la Aplicación Agrícola de Purines en la Zona No Saturada del Suelo*. Influencia de las Variables Relacionadas con la Estructura del Terreno. Tesis Doctoral de la Universidad Politécnica de Valencia.
- Mora-Donjuán, C. A., Alanís Rodríguez, E., Jiménez Pérez, J., González Tagle, M. A., Yerena Yamalle, J. I., & Cuellar Rodríguez, L. G. (2013). *Estructura, Composición Florística Y Diversidad Del Matorral Espinoso Tamaulipeco, México*. *Ecología Aplicada*, 12(1– 2), 29. <https://doi.org/10.21704/rea.v12i1-2.435>
- Moreno, H., Ibáñez, S. y Gisbert, J. M. (sf). *Sulfatos*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Valencia.
- Moreno, J. (2010). *Recuperación de suelos mineros contaminados con Arsénico mediante biotecnologías*. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.

- Munsell, A. H. (2000). *Munsell Soil Color Charts*. GretagMacbeth. Revised washable edition.
- Murad, E. & W.R. Fischer. (1985). *The geobiochemical cycle of iron*. pp. 1-18. In: Stucki, J.W., B.A. Goodman y U. Schwertmann (eds.). *Iron in soils and clay minerals*. NATO ASI Series C217. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht, The Netherlands
- Muro, E. (sf). *Lixiviación*. Consultado el 26 de enero de 2022 en el enlace: <https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/terminos/Lixiviac.htm#:~:text=Se%20llama%20as%C3%AD%20al%20fen%C3%B3meno,tanto%2C%20caracter%C3%ADstico%20de%20climas%20h%C3%BAmedos.>
- Novotny, V. (1995). *Diffuse sources of pollution by toxic metals and impact on receiving waters*. *Heavy Metals*. 33(52). 412-427.
- Olmedo, J.L. (1971). *Algunos aspectos de la distribución y formas del hierro en los suelos*. *An. Edafol. Agrobiol.* 30: 441-632.
- OMS (Organización Mundial de la Salud), (2007). *Guías para la calidad del agua potable*, en Biblioteca de la OMS, Vol. 1, N.º 3, 2007, pp. 1-398. Disponible en www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf
- OPS, (Organización mundial de la salud) (1987). *Guías para la calidad del agua potable vol. 2. Criterios relativos a la salud y otra información de base*. Publicación científica No. 506. Washington D.C. 343 pp.
- Ordoñez, (2011). Esquema del ciclo hidrológico. Consultado el día 10 de febrero de 2022 en el enlace: www.eoearth.org/article/Hydrologic_cycle
- Peña, S. (2006). *Introducción a la hidrología subterránea*.
- Pérez, I. (2015). *Ecotoxicología del Arsénico en suelos de la comunidad de Madrid*. Facultad de Farmacia, Departamento de Edafología. España
- Podgorski, J. and Berg, M. (2020). Global threat of arsenic in groundwater. *Science*, 368, 845 – 850
- Polanco, A. (2009). *Manual de prácticas de laboratorio de mecánica de suelos I*. Chihuahua: Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Poch, M. R. (2010). *Introducción a la Edafología, Uso y protección de suelos*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Powers, M.C. (1953). *A new roundness scale for sedimentary particles*. *Jour. Sed. Pet.*, vol. 23, No. 2:117-119.
- Ramírez, A. y San José, C. (2010). *El sodio en la Naturaleza*. *Anales de la Real Academia de Doctores de España Volumen 14*, pp. 213-223.
- Rascón, B. (2011). *Estudio hidrogeoquímico y de vulnerabilidad a la contaminación de la porción Sur del acuífero Meoqui-Delicias, del Estado de Chihuahua*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Reuss, J. O. & Johnson, D. W. (1986). *Acid Deposition and the Acidification of Soils and Waters* (Vol. Ecological Studies Series no. 59). Springer-Verlag: New York.

- Reyes, I. A. (1992). *Historia general de Chihuahua I: Geología, geografía y arqueología*. Universidad de Ciudad Juárez, P. 14 – 42, ISBN: 9686287248.
- Reyes-Cortés, I. A., M. Reyes Cortés, A. Oviedo García. (2014). *Geología, en: La biodiversidad en Chihuahua: Estudio de Estado*. Conabio. México, pp.26-39.
- Reyes-Gómez, V. M., Alarcón-Herrera, M. T., Gutiérrez, M. and Núñez-López, D. (2013). *Fluoride and arsenic in an alluvial aquifer system in Chihuahua, Mexico: contaminant levels, potential sources, and co-occurrence*. *Water Air Soil Pollut.* 224(2): 1433.
- Rodier, J. (1981). *Análisis de las aguas naturales, Aguas residuales y aguas de mar. Química, Física-Química, Bacteriológica y Biología*. Ediciones Omega S. A. Barcelona, España.
- Rodríguez-Mercado, J. J. & Altamirano-Lozano, M. A. (2006). *Vanadio: Contaminación, Metabolismo Y Genotoxicidad*. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 22(4), 173-189. Recuperado el 21 de julio de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992006000400173&lng=es&tng=es.
- Romero, K. G. (2019). *Estudio hidrológico e hidrogeoquímico del Distrito de Riego Buenaventura, Chihuahua, México*. Tesis presentada para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología en la Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Rose, E. R. (1973). *Geology of vanadium and vaniferous occurrences of Canada*. Geological Survey of Canada. Department of Energy, Mines and Resources Canada.
- Royo, M., Villalba M. L., Chávez, R., Lona, L. M., Pinales, A., Alva, L., Urrutia, J., González, J. A., Franco, M., Martínez, P., Royo, M., De la Garza, R., Aguirre, B. y Colmenero, L. (2008). *Geología y geohidrología en el sector occidental del Valle de Delicias, Chihuahua, México*. Cartel en Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana.
- Ruiz, M. P. (2017). *Bioacumulación de distintas especies de selenio y sus efectos en organismos marinos*. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10272/15083>
- Ruiz, Y. (2008). *Investigación de la presencia de arsénico en el agua subterránea del acuífero de Meoqui Delicias, Chihuahua*. Tesis de Maestría de Tecnológico de Monterrey, México.
- Sánchez Bernal, E. I., Ortega Escobar, H. M., Sandoval Orozco, G. T., Hernandez Viruel, R. A., & Estrada Vázquez, C. (2012). *Lavado de Sales en Suelos Aluviales Costeros de Oaxaca, México, con Aguas Residuales Municipales Tratadas*. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 344-358.
- Schwertmann, U. (1990). *Some properties of soil and synthetic iron oxides*. pp. 57-84. In: De Boodt, M.F., M.H.B. Hayes y A. Herbillon (eds.). *Soil colloids and their associations in aggregates*. NATO ASI Series B214. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht, The Netherlands.

- Schwertmann, U. and Taylor, R.M. (1989). *Iron Oxides*. In: Dixon, J.B. and Weed S.B., Eds., *Minerals in Soil Environments*, 2nd Edition, Soil Science Society of America, Inc., Madison, 379-438.
- SCT (Secretaría de Comunicación y Transporte) (2003). *Métodos de muestreo y prueba de materiales*.
- SDR (2013). *Cartografía de Uso de Suelo y Vegetación del Estado de Chihuahua*, Escala 1:50,000. Secretaría de Desarrollo Rural.
- Ségalen, P. (1973). *Importancia y papel del Hierro y del Aluminio en los suelos de las regiones cálidas y húmedas*. Academia de Ciencias de Cuba. Instituto de Suelos. Pp. 2-6
- SEMARNAT (2012). *Atlas del medio físico, biótico y ambiental del Estado de Chihuahua*. P. P. 149, ISBN: 978-607-7908-53-1.
- Seoanez, C.M. (2003). *Manual de tratamiento, reciclado, aprovechamiento y gestión de las aguas residuales de las industrias agroalimentarias*. 1ª edición. Editorial Mundi Prensa Libros. México, D.F. 332 p.
- Serrano, R. A. (2013). *Proyecto pruebas geometalúrgicas de recursos lixiviables, CIMM TYS Antofagasta*. Tesis de licenciatura. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
- SGM (2000). *Carta Geológico-Minera Ciudad Delicias H13-11*, Chihuahua.
- Shaji, E., Santosh, M., Sarath, K. V., Prakash, P., Deepchand, V. and Divya, B. V (2021). *Arsenic contamination of groundwater: A global synopsis with focus on the Indian Peninsula*. Geosci. Front. 101079.
- Siegel, F. R. (2002). *Environmental Geochemistry of Potentially Toxic Metals*. Editorial Springer. Berlin. Capítulo 3. Pp. 45-57 (2002).
- Soon, Y. K. (1993). *Fractionation of Extractable Aluminum in Acid Soils: A Review and a Proposed Procedure*. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 24, 1683-1708.
- Soto, A. C. (2016). *Distribución espacial de las propiedades físicas y químicas de los suelos por unidades fisiográficas en la microcuenca Las Pavas, Distrito Mariano Dámaso Beraún – Las Palmas*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero en Recursos Naturales Renovables. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Steinich B., Velázquez, G., Marín, L. y Perry, E. (1996). *Determination of the ground water divide in the karst aquifer of Yucatan, Mexico, combining geochemical and hydrogeological data*. *Geofísica Internacional*. Vol. 35, Num. 2, pp.153-159.
- Stone, J. G. (1958). *Ore Genesis in the Naica District, Chihuahua, México*. Stanford University, a Dissertation for The Degree of Doctor of Philosophy
- Tamoh K., Maslouhi A., Candela L., y Carrera J. (2005). *Evaluación del lixiviado de nitratos mediante el código GLEAMS acoplado a un SIG. Aplicación al acuífero de Mnasra (Marruecos)*. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VII*. F.J. Samper Calvete y A. Paz González.

- Tenorio, D. A., y Fuentes, R. J. (2014). *Aplicación de métodos Analíticos Normalizados para determinar Hierro total (Fe), Cloruro (Cl-) y Nitritos (NO₂-) en muestras de agua Potable del pozo de la UNAN-Managua y la abastecida por ENACAL, en el periodo Agosto-Diciembre 2013*. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua
- Terrazas, L. P. (2008). *Preparación e implementación de membranas compuestas de triacetato de celulosa y partículas de carbón activado para la remoción de arsénico en agua*. Tesis de Maestría Centro de Investigación de Materiales Avanzados (CIMAV).
- Thompson, L.M. y Troeh, F.R., (1982). *Los suelos y su fertilidad*. 4 ed. Barcelona: Reverté.
- Tomás, R., Cano, M., García-Barba, J., Santamarta, J.C., Hernández, L.E., Rodríguez, J.A., Zamora, R. (2013). *Prácticas de Ingeniería del Terreno*. Universidades de Alicante y de La Laguna.
- Torrellas, R. (2013). *Exposure to aluminum and its relationship between environment and health*. Universidad Central de Venezuela. Udana Inc. Houston, TX, USA.
<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tecges/article/view/5646/7188>
- UNITECNIA S.A de C.V. (1999). *Reactivación de la red de monitoreo piezométrico del acuífero del Valle de Buenaventura en el Estado de Chihuahua*. Comisión Nacional del Agua. Gerencia de aguas subterráneas.
- Universidad de Alicante (2020). *Atlas Digital de Petrografía Sedimentaria*. Aspectos texturales, consultado el 20 de noviembre de 2021 en el enlace: <https://web.ua.es/es/e-pesedua/siliciclasticas/aspectos-texturales.html>
- Vega, S. (2002). *Riesgo Sanitario Ambiental por la presencia de Arsénico y Fluoruros en los Acuíferos de México*, estudio realizado por la Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua CNA, México.
- Velázquez G. (1996). *Estudio geoquímico del anillo de cenotes, Yucatán*. Tesis Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Villalaz, C. C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*, Limusa.
- Villalobos, A. (2004). *Sedimentología e hidrogeología del abanico aluvial de la Laguna de Encinillas, Chihuahua, México*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Villasuso, M. y Méndez, R. (2000). *A conceptual model of the aquifer of the Yucatan Peninsula*. International Institute for Applied Systems Analysis.
- Wild, A. (1993). *Soils and the environment: an introduction*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Zamarrón, L. (2013). *Análisis hidrogeoquímico de los acuíferos Chihuahua-Sacramento Y El Sauz-Encinillas, Chihuahua, México*. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Chihuahua.

Capítulo 8. Anexos

A. Clima

De acuerdo con el sistema de clasificación climática desarrollado por Köppen y modificado por la M. C. Enriqueta García para la República Mexicana (1990), para México, dentro de las zonas de estudio, existen una diversidad de climas que van desde el tipo muy árido hasta semifrío subhúmedo. A continuación, se presenta la descripción de cada uno de ellos basados en esta clasificación, y posteriormente una tabla de la cobertura de cada uno de los acuíferos.

- **BS0k''w:** Es un clima árido, semifrío, con temperaturas medias anuales entre 5 y 12 °C, las lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
- **BS1k(k'):** Representa un clima semiárido, templado, con temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C, temperatura del mes más caliente menor de 22 °C. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.
- **BS1kw:** Este clima se describe como un clima semiárido templado, es un clima estepario que corresponde a los menos secos de los secos, semiseco, templado con verano cálido. Las temperaturas medias anuales se encuentran entre 12 °C y 18 °C, la temperatura del mes más frío y más caliente son -3 °C y 22 °C respectivamente. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
- **BS1k''w:** Clima semiseco, presenta lluvias con un porcentaje de precipitación invernal entre 5 y 10.2mm, la temperatura media anual entre 5 y 12°C, la del mes más frío entre -3 y 18°C y la del mes más caliente menor de 18°C.
- **BS0kw:** Clima árido, templado, con veranos cálidos, temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C. Lluvias de verano, porcentaje de lluvia invernal entre 5% y 10.2% del total anual.

- **BS0kw(w)**: Es el clima estepario más seco, templado con lluvias en verano, el porcentaje de precipitación invernal es menor de 5%, es decir, presenta sequía en esta época del año, verano cálido.
- **BWhw**: Se describe como un clima muy árido, semicálido, con temperaturas media anual entre oscila entre 18 y 22 °C, temperatura del mes más frío menor de 18 °C, temperatura del mes más caliente mayor de 22 °C. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
- **BWkw**: Clima muy árido, templado, temperatura media anual que varía entre 12 °C y 18 °C. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
- **BWkw(w)**: es un clima muy árido, templado, temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C, temperatura del mes más caliente menor de 22 °C.
- **Cb'(w1)x'**: Clima semifrío, subhúmedo con verano largos y frescos, temperatura media anual entre 5 °C y 12 °C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C, temperatura del mes más caliente bajo 22 °C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.
- **Cb'(w1)x'**: Semifrío subhúmedo con veranos frescos largos, temperatura media anual entre 5 °C y 12 °C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C, temperatura del mes más caliente bajo 22 °C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.
- **C (w1)**: Corresponde al grupo de climas templados subhúmedos, intermedio en cuanto a humedad, con lluvias en verano, temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C y temperatura del mes más caliente bajo 22 °C.
- **C (E) (w1)**: Corresponde al grupo de climas templados húmedos, semifríos de humedad media con lluvias en verano.

Tabla A17. Clima predominante por acuífero

Código	% cobertura			
	Cuahtémoc	Buenaventura	Meoqui-Delicias	El Sauz-Encinillas
BS1kw	78.25%	3.60%		27.20%
BS1k"w	15.34%			
Cb'(w1) x'	7%	1.60%		
BSokw		65.70%	19.07%	29.00%
BWkw		27.50%		
BS1k(k'):		1%		
BS0k" w.		0.70%		
BSohw			59.28%	
BWhw			21.61%	
BWkw(w)				3.70%
C(E)(w1)				8.80%
C(w1)				11.90%
BSokw(w)				19.50%

B. Uso de Suelo y cubierta Vegetal

De acuerdo con la clasificación de Uso de Suelo y Cubierta Vegetal propuesta por el INEGI (Serie V), existen diversas claves para cada uno de los usos de suelo, así como los distintos tipos de vegetación.

De acuerdo con la Guía para la interpretación de cartografía potencial del suelo (SDR, 2013), INEGI (2014) e información de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) en las zonas de interés se encuentra las siguiente vegetaciones y usos de suelo.

a) Matorrales. – Vegetación que presenta ramificaciones desde la base del tallo, se considera vegetación arbustiva, ya que no crece más de 4 metros de altura, es propia de zonas áridas.

- Matorral desértico micrófilo (MDM). – Predominan arbustos de hojas pequeñas, normalmente crecen sobre llanuras, pies de monte y en terrenos aluviales y coluviales, característicos de suelos Xerosol y Yermosol.

- Matorral desértico rosetófilo (MDR). – Predominan la vegetación arbustiva y subarbustiva con hojas alargadas y estrechas en forma de rosetas, se ubican en laderas de origen sedimentario y zonas áridas y semiáridas, frecuentemente se encuentran en suelos Litosol, Rendzina o Regosol.

- Mezquital xerófilo (MKX). – Vegetación arbustiva asociada a condiciones climáticas áridas y semiáridas, se desarrolla principalmente en el norte del país. La comunidad está formada por arbustos bajos y medianos.

- Vegetación de Desiertos Arenosos (VD). – Comunidad vegetal formada principalmente por arbustos localizados sobre dunas de arena en los desiertos.

- Vegetación de Galería (VG). – es vegetación que se desarrolla de forma paralela a los cauces de agua, poseen diversidad vegetal, siendo las especies arboleas buenos indicadores de la calidad del agua.

- Vegetación Halófila. – Este tipo de vegetación se desarrolla en suelos con altos contenidos de sales, en las cuencas cerradas, es decir cerca de lagunas o cuerpos de agua que se evaporan y permiten la acumulación de sales.

b) Bosques. – Vegetación propia de zonas montañosas, específicamente en las regiones altas de las sierras, forman masas arboladas con poca variación de especies.

- Bosque de pino (BP). – Comunidades arbóreas, generalmente de regiones templadas y frías, localizada principalmente en las zonas montañosas, por lo común existe un mínimo de variación de especies de coníferas por zonas.

- Bosque de pino-encino (BPQ). – Esta transición de bosques está dada por el gradiente de altitud de las zonas serranas. Se encuentran arboles de diferentes especies de pinos y encinos, predominando la primera especie.

- Bosque de encino (BQ). – Compuesto de árboles de encino y/o robles, se encuentran en las zonas bajas o intermedias de la provincia Sierra Madre Occidental y se desarrolla en suelos Regosol y Litosol.

- Bosque de encino-pino (BQP). – Similares a los bosques pino-encino, pero en este tipo predominan los encinos y se encuentran en el límite inferior de los bosques mencionados anteriormente.

c) Pastizales. – Abarcan todas las áreas donde la vegetación predominante sean gramíneas y pueden dividirse en pastizales naturales y pastizales halófilos.

- Pastizales naturales (PN). – La vegetación dominante son las plantas herbáceas de tipo graminiforme y constituyen una de las vegetaciones más aptas para el desarrollo de ganadería, se desarrollan sobre los pies de monte sobre zonas llanas de origen aluvial, mesetas o laderas bajas.

- Pastizales inducido (PI). – Es constituida por gramíneas que crecen cuando es eliminada la vegetación original ya sean las causas desmontes, incendios o áreas agrícolas abandonadas. También puede presentarse el desarrollo de estos

pastizales una vez destruidos los bosques de pino y de encino, característicos de las zonas montañosas de México.

- Pastizal halófilo (PH). – Localizado en suelos con altos contenidos de sales solubles, ubicados en las zonas bajas de las cuencas cerradas, en donde se tienen variaciones de nivel de agua, como lo pueden ser márgenes de lagos o lagunas y en climas con baja precipitación y alta tasa de evaporación, la vegetación no alcanza alturas mayores a los 80 cm.

- d) Agrícola-Pecuaria-Forestal (IAPF)

- Agricultura de temporal. – Posee poca variedad de cultivos, suelen ser cultivos de maíz, frijol, avena, milo.

- Agricultura de riego. – Predominan cultivos de alfalfa, trigo, maíz, forrajes, sorgo, frijol y frutales.

- e) Asentamiento Humano (AH) y Zonas Urbanas (ZU). Área donde existe un agrupamiento de construcciones permanentes, de acuerdo con una traza urbana, a la que se le asocia un nombre.

- f) Otro tipo de vegetación. Son comunidades vegetales con características ecológicas especiales como fisonomía, origen (suelo, fuego, agua, etc.).

- Mezquital (MK). – Comunidad vegetal dominada principalmente por mezquites (*Prosopis spp.*). Se desarrolla frecuentemente en terrenos de suelos profundos y en aluviones cercanos a escorrentías. El mezquite es considerado un recurso natural muy importante para las zonas áridas y semiáridas del país. Debido a las características del suelo donde se localiza es eliminado constantemente para incorporar terrenos a la agricultura

- g) Vegetaciones secundarias (VSa/...). – De manera natural existen alteraciones en la florística de las comunidades vegetales, como pueden ser nevadas, sequías, plagas, variaciones climáticas, etc., cuando esto ocurre la vegetación tiene que modificar su estructura y composición de manera que pueda adaptarse tomando en cuenta las condiciones de la alteración, el tiempo

transcurrido, así como su ubicación geográfica. Estas adaptaciones se llaman Vegetación Secundaria, cabe mencionar que debido a la actividad humana las variaciones de este tipo de vegetación se vuelven más complicada de definir, además grandes extensiones son desarrolladas como vegetación inducida, por lo que se dificulta el regreso a la vegetación original del área.

En las siguientes Tablas, se muestran los tipos de Uso de suelo y cubierta vegetal para cada acuífero.

Tabla B18. Uso de Suelo y Cubierta Vegetal en el acuífero Cuauhtémoc

Clave	Descripción	Cobertura (km²)	% de cobertura
AH	Asentamiento Humano	128.20	3.61%
BP	Bosque de Pino	4.3	0.13%
BPQ	Bosque de Pino - Encino	192.1	5.63%
BQ	Bosque de Encino	100.1	2.94%
BQP	Bosque de Encino - Pino	645.4	18.92%
H2O	Agua	103.0	3.02%
IAPF	Agrícola-Pecuaria-Forestal	1818.1	53.3%
PI	Pastizal Inducido	248.3	7.28%
PN	Pastizal Natural	58.3	1.71%
VSa/BPQ	Vegetación Secundaria Bosque de Pino - Encino	31.0	0.91%
VSa/BQ	Vegetación Secundaria Bosque de Encino	32.3	0.95%
VSa/BQP	Vegetación Secundaria Bosque de Encino - Pino	27.6	0.81%
ZU	Zona Urbana	27.2	0.80%

Tabla B19. Uso de suelo y cubierta vegetal acuífero Buenaventura.

Clave	Descripción	Cobertura (km²)	% de cobertura
AH	Asentamiento Humano	2.88	0.10%
BG	Bosque de Galería	2.99	0.10%
BPQ	Bosque de Pino - Encino	24.83	0.82%
BQ	Bosque de Encino	245.63	8.10%
BQP	Bosque de Encino - Pino	105.90	3.49%
IAPF	Agrícola-Pecuaria-Forestal	302.58	9.97%
MDM	Matorral Desértico Micrófilo	286.36	9.44%
MK	Mezquital	8.92	0.29%
MKX	Mezquital Xerófilo	105.67	3.48%
PH	Pastizal Halófilo	134.12	4.42%
PI	Pastizal Inducido	184.40	6.08%
PN	Pastizal Natural	809.72	26.69%
VD	Vegetación De Desiertos Arenosos	19.35	0.64%
VG	Vegetación De Galería	31.70	1.04%
VH	Vegetación Halófila	89.10	2.94%
VSa/BPQ	Vegetación Secundaria Bosque de Pino - Encino	0.95	0.03%
VSa/BQP	Vegetación Secundaria Bosque de Encino - Pino	26.34	0.87%
Vsa/MDM	Vegetación Secundaria Matorral Desértico Micrófilo	68.53	2.26%
VSa/MKX	Vegetación Secundaria Mezquital Xerófilo	129.55	4.27%
VSa/PN	Vegetación Secundaria Pastizal Natural	408.22	13.46%
VSa/VH	Vegetación Secundaria Vegetación Halófila Xerófila	37.69	1.24%
ZU	Zona Urbana	8.37	0.28%

Tabla B20. Uso de suelo y cubierta vegetal acuífero Meoqui Delicias.

Clave	Descripción	Cobertura (km²)	% de cobertura
AH	Asentamiento Humano	40.45	0.84%
BG	Bosque de Galería	12.93	0.27%
DV	Sin Vegetación Aparente	6.24	0.13%
IAPF	Agrícola-Pecuaria-Forestal	1232.74	25.62%
MDM	Matorral Desértico Micrófilo	1462.88	30.40%
MDR	Matorral Desértico Rosetófilo	234.55	4.87%
MK	Mezquital	59.28	1.23%
PH	Pastizal Halófilo	346.00	7.19%
PI	Pastizal Inducido	20.52	0.43%
PN	Pastizal Natural	437.03	9.08%
VG	Vegetación de Galería	18.36	0.38%
Vsa/MDM	Vegetación Secundaria Matorral Desértico Micrófilo	494.70	10.28%
Vsa/MDR	Vegetación Secundaria Matorral Desértico Rosetófilo	96.43	2.00%
Vsa/PH	Vegetación Secundaria Pastizal Halófilo	4.03	0.08%
Vsa/PN	Vegetación Secundaria Pastizal Natural	313.05	6.51%
ZU	Zona Urbana	33.18	0.69%

Tabla B21. Uso de suelo y cubierta vegetal acuífero El Sauz Encinillas.

Clave	Descripción	Cobertura (km²)	% de cobertura
AH	Asentamiento Humano	0.54	0.02%
BP	Bosque de Pino	7.29	0.27%
BPQ	Bosque de Pino - Encino	153.88	5.61%
BQ	Bosque de Encino	157.35	5.74%
BQP	Bosque de Encino - Pino	220.86	8.05%
PH	Pastizal Halófilo	305.26	11.13%
PN	Pastizal Natural	1049.29	38.25%
PI	Pastizal Inducido	17.67	0.64%
IAPF	Agrícola-Pecuaria-Forestal	225.94	8.24%
ZU	Zona Urbana	1.64	0.06%
H20	Cuerpo de agua	14.05	0.51%
DV	Sin Vegetación Aparente	0.80	0.03%
MDM	Matorral Desértico Micrófilo	206.88	7.54%
MK	Mezquital	22.52	0.82%
MKX	Matorral – Mezquital Xerófilo	11.39	0.42%
VD	Vegetación De Desiertos Arenosos	0.40	0.01%
VG	Vegetación De Galería	10.78	0.39%
Vsa/BQP	Vegetación Secundaria Bosque de Encino - Pino	62.34	2.27%
Vsa/BPQ	Vegetación Secundaria Bosque de Pino - Encino	244.86	8.93%
Vsa/MDM	Vegetación Secundaria Matorral Desértico Micrófilo	2.60	0.09%
Vsa/PN	Vegetación Secundaria Pastizal Natural	26.82	0.98%

C. Edafología

Según la información de la carta Edafológica de INEGI, los suelos dominantes de mencionan a continuación, así como una descripción según SEMARNAT (2012).

- **Calcisol** (CL) Se distinguen por presentar una capa dura de “caliche” a menos de un metro de profundidad, una gran cantidad de calcio, esto los convierten en suelos secos e infértiles. Son característicos de climas desérticos.
- **Cambisol** (CM) Suelos con un subsuelo muy diferente a simple vista en color y textura a la capa superficial. La capa superficial puede ser oscura, con más de 25 cm de espesor, pero pobre nutrientes y en ocasiones no existe. El horizonte B se caracterizan por tener una textura arenosa o más fina, con estructura moderadamente desarrollada.
- **Chernozem** (CH) Suelos negro, muy fértil con concentraciones de humus, potasio, fosforo y microelementos, lo que lo hace un excelente suelo para la agricultura, se asocian a regiones con un clima continental con inviernos fríos y veranos cálidos.
- **Durisol** (DU) Suelos con acumulación de sales menos solubles o sustancias no salinas, específicamente sílice.
- **Fluvisol** (FL) Son suelos jóvenes que se desarrollan en depósitos de ríos, lacustres y marinos, es decir, material transportado, muy poco desarrollado y medianamente profundo; encontrándose en ambientes de planicies aluviales, valles, ríos, marismas costeras, la característica principal es su visible estratificación, presentan capas alternas de arena y grava.
- **Gleysol** (GL) Son suelos no estratificados en áreas con nivel freático que no reciben aportaciones regulares de sedimentos, con signos claros de exceso de humedad.
- **Kastañozem** (KS) tipo de suelo que presentan una capa superior de color pardo o rojizo oscuro, con buen contenido de materia orgánica y nutrientes. El subsuelo

tiene acumulación de caliche y/o yeso, son suelos orgánico y asociado a climas cálidos.

- **Leptosol** (LP) Suelo con enraizamiento limitado, debido a que es un suelo somero y extremadamente gravilloso.
- **Luvisol** (LV) Suelos con mucha arcilla acumulada en el subsuelo. Se diferencian de los Acrisoles en que son más fértiles en general.
- **Paheozem** (PH) Acumulación de materia orgánica, alta saturación, normalmente se encuentra en la transición a climas más húmedos. Estos suelos se encuentran en todo tipo de relieve y clima, a excepción de regiones tropicales lluviosas o muy desérticas con tierra parda. Es el cuarto tipo de suelo más abundante en todo el país. Posee una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica, y son de espesores variables.
- **Planosol** (PL) Suelos con agua estancada con discontinuidad textural abrupta.
- **Regosol** (RG) Suelos de material suelto que cubre a la roca, tienen poco desarrollo y no presentan capas muy diferenciadas entre sí. Generalmente son claros o pobres en materia orgánica y son similares a la roca que los origina.
- **Solonetz** (SN) Suelos con un subsuelo arcilloso y terrones en forma de columnas o prismas por poseer un alto contenido de sales de sodio. Es utilizado para ganadería en las áreas donde presenta desarrollo de pastizal.
- **Solonchak** (SC) Suelos salinos que se encuentran en las partes más bajas de los valles. Suelen relacionarse con la vegetación halófila
- **Umbrisol** (UM) Presentan un horizonte superficial grueso oscuro, ácido y muy rico en materia orgánica.
- **Vertisol** (VR) Suelos muy arcillosos en cualquier capa a menos de 50 cm de profundidad; en época de secas tienen grietas muy visibles a menos de 50 cm de profundidad, siempre y cuando no haya riego artificial. Estos suelos se agrietan en la superficie cuando están muy mojados.

Tabla C22. Cobertura edafológica en el acuífero Cuauhtémoc.

Clave	Área de cobertura (km²)	% cobertura
CM	94.41	2.8%
DU	31.21	0.9%
GL	14.40	0.4%
LP	770.56	22.6%
LV	1058.30	31.0%
PH	755.35	22.1%
PL	103.72	3.0%
RG	179.60	5.3%
UM	5.56	0.2%
VR	219.94	6.4%
Cuerpos de agua	177.79	5.2%

Tabla C23. Cobertura edafológica en el acuífero Buenaventura.

Clave	Área de cobertura (km²)	% cobertura
CL	544.91	18.00%
CM	653.21	21.57%
FL	57.31	1.89%
LP	1140.91	37.68%
LV	101.11	3.34%
PH	29.85	0.99%
RG	337.99	11.16%
SN	111.96	3.70%
UM	48.76	1.61%
VR	2.07	0.07%

Tabla C24. Edafología del acuífero Meoqui – Delicias.

Clave	Área de cobertura (km²)	% cobertura
CH	380.89	7.97%
CL	1824.79	38.20%
CM	372.02	7.79%
KS	269.74	5.65%
LP	879.82	18.42%
LV	218.93	4.58%
PH	242.58	5.08%
RG	114.17	2.39%
VR	474.42	9.93%

Tabla C25. Edafología del acuífero El Sauz Encinillas

Clave	Área de cobertura (km²)	% cobertura
CL	42.74	1.56%
CM	280.77	10.24%
FL	86.96	3.17%
LP	394.03	14.36%
LV	286.53	10.44%
Cuerpos de agua	26.61	0.97%
PH	1071.06	39.04%
RG	176.51	6.43%
SC	30.97	1.13%
SN	345.57	12.60%
UM	1.40	0.05%
VR	0.09	0.00%

D. Caracterización sedimentológica

- Muestra M01

El material de la Muestra M01, es un material mal clasificado, se tienen granos de tamaños mayores a los 3 mm de diámetro (Figura 55), y partículas menores a 1/8 de mm de diámetro, el material es subredondeado de alta esfericidad, se clasifica como material submaduro textural y composicionalmente ya que se tiene un bajo contenido de arcillas, se observan algunos cristales de cuarzo, y algunos de feldespatos y posibles plagioclasas (fragmentos de cristales blancos y rosados). El color del material es café rojizo, con un código según la escala de color de Munsell 5YR3/4.

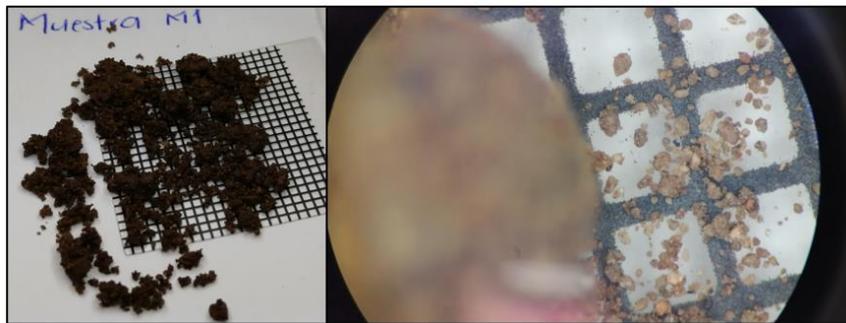


Figura 55. Muestra M01 en lupa

La muestra M02 se define como un material mal clasificado, hay granos con diámetros mayores a 1 mm y otros con tamaños menores a 1/8 de mm de diámetro, la mayoría de los granos son subredondeados de baja esfericidad, a excepción de los granos de mayor tamaño que están poco más esféricos, entra en la clasificación de estado inmaduro composicional y texturalmente ya que se observa presencia de arcillas. El color del material es 2.5YR3/2 de acuerdo con la escala de Munsell (Figura 56).

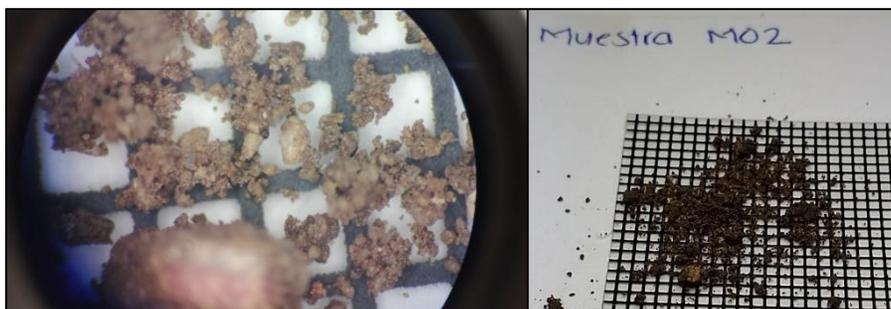


Figura 56. Muestra M02 en lupa

Se observa un material mal clasificado en la muestra M03, se tienen fragmentos que van de $\frac{1}{2}$ mm a menores de $\frac{1}{8}$ de mm de diámetro. Se observan fragmentos que van de subangulosos a subredondeados con baja esfericidad, los fragmentos de mayor tamaño se aprecian redondeados. En general el material se encuentra en un estado submaduro a inmaduro texturalmente hablando, y submaduro composicionalmente, el color es marrón oscuro con un ligero tono rojizo, utilizando los colores de Munsell el código de color es 2.5YR2.5/3 (Figura 57).



Figura 57. Muestra M03 en lupa

El material de la muestra M04 se encuentra de moderadamente clasificado, los fragmentos son todos menores a $\frac{1}{4}$ de mm de diámetro, son granos subredondeados de alta esfericidad en su mayoría, se encuentran en un estado de inmaduro a submaduro texturalmente (se aprecia una cantidad considerable de material fino) e inmaduro composicionalmente, no se aprecia una cantidad considerable de cuarzo. El color del material es de un tono marrón tirando a negro, la clave de acuerdo con Munsell es 10YR2/2 (Figura 58).

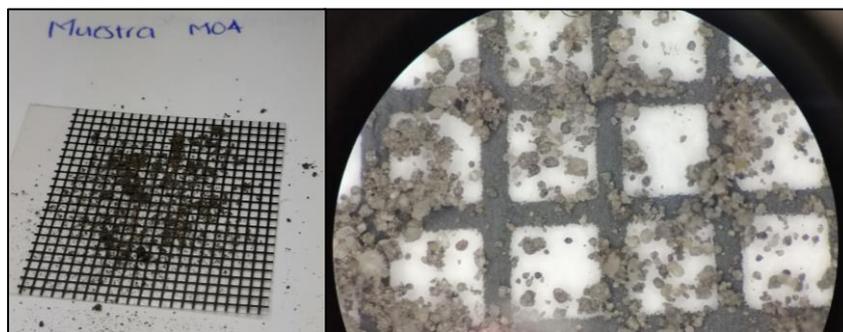


Figura 58. Muestra M04 en lupa

La muestra M04B, tomada unos metros por debajo de la muestra M04, a diferencia de ésta la coloración varia a una tonalidad gris – verdosa 10YR6/1 estando húmedo. En general el material se encuentra mal clasificado, hay fragmentos que van de 1 cm de diámetro a fragmentos que menores de $\frac{1}{4}$ de m de diámetro, predominando la porción fina. Hay granos subangulosos de baja esfericidad (Figura 59), en menor cantidad se encuentran granos subredondeados de alta esfericidad, en general el material se encuentra en un estado inmaduro textural y composicionalmente.

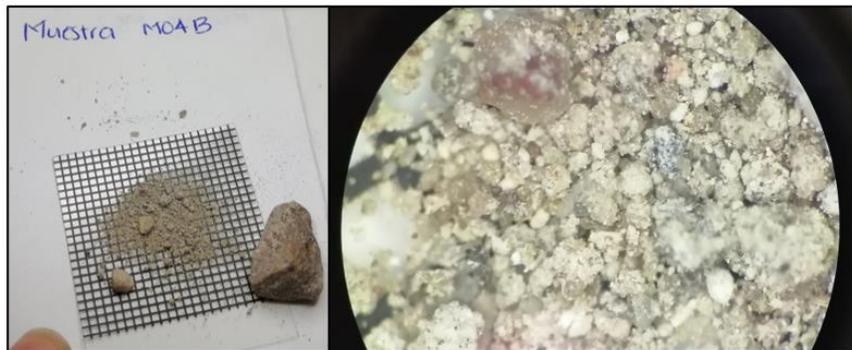


Figura 59. Muestra M04B en lupa

El material se encuentra mal clasificado en la muestra M05, hay partículas mayores a los 2 mm y la mayoría menores a $\frac{1}{2}$ mm de diámetro. Un alto porcentaje de los granos van de subangulosos a subredondeados, con baja esfericidad. Se encuentra en un estado submaduro, se alcanzan a observar algunos cristales de cuarzo. El color del material es de una tonalidad rojiza, de acuerdo con los colores de Munsell, el color tiene una clave de 2.5YR3/3 estando húmedo (Figura 60) posiblemente se tiene un alto contenido de fierro.



Figura 60. Muestra M05 en lupa

El material es subredondeado de alta esfericidad (Figura 61), se clasifica el material como dentro de un estado submaduro, contiene un bajo porcentaje de cuarzo, y se alcanzan a apreciar algunos cristales de plagioclasas (cristales de tonalidad blanquesinas) y feldspatos. El color del material en campo es de un tono marrón con un código de 5YR4/4 de acuerdo con la clasificación de Munsell.

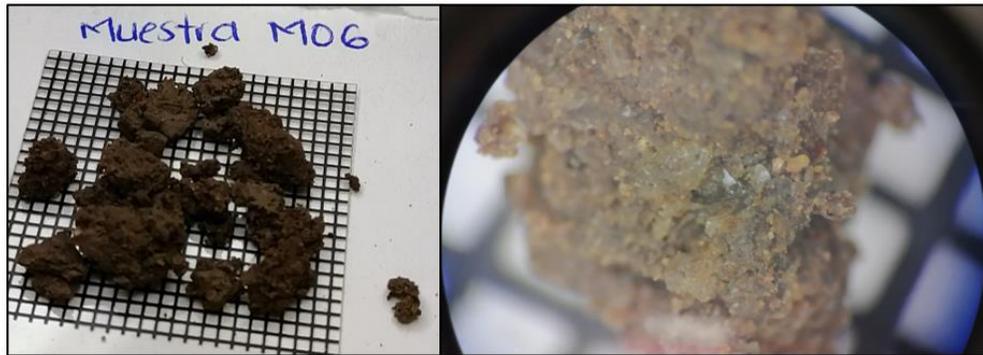


Figura 61. Muestra M06 en lupa

La muestra M07 se considera moderadamente clasificado, las partículas más finas son menores a 1/8 de mm de diámetro, presentan baja esfericidad y características angulosas a subangulosas. Los granos más grandes son mayores a 1/4 de mm de diámetro y muestran alta esfericidad, van de subangulosos a subredondeados. Se aprecian muy pocos cristales de cuarzo, por lo que se cataloga como en estado inmaduro a submaduro. El color es café ligeramente con tonalidad rojiza, 5YR5/3 de acuerdo con los colores establecidos por Munsell (Figura 62).

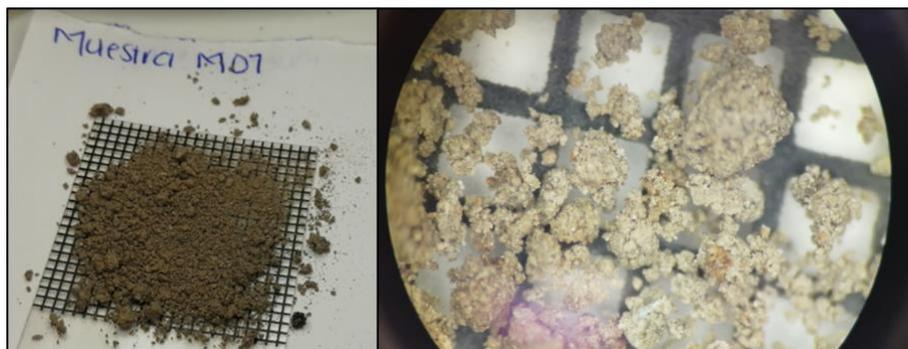


Figura 62. Muestra M07 en lupa

La muestra M08 es material mal clasificado, hay granos de más de 1 cm de diámetro, recubiertos de óxido de manganeso y fierro (Figura 63), y algunos granos

menores a $\frac{1}{4}$ de mm de diámetro, los granos son angulosos a subangulosos de baja esfericidad. Se encuentra en un estado inmaduro a moderado. Composicionalmente e inmaduro texturalmente. La coloración del material es marrón oscuro, de acuerdo con Munsell el color es 7.5YR2.5/1. El material contenía abundante materia orgánica y presencia de organismos (gusanos y lombrices).

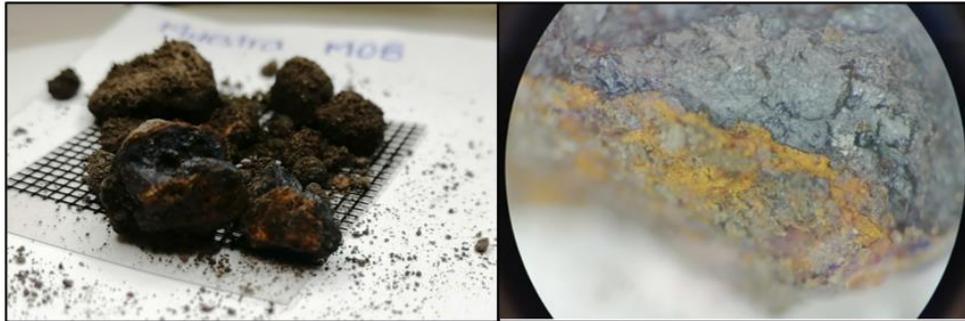


Figura 63. Muestra M08 en lupa

El material de la muestra M09 tiene un alto contenido de humedad por lo que se forman agregados/grumos los cuales se amoldan mal movimiento que se les dé, comportándose como plastilina. No se distinguen las partículas individuales por lo que se asume que se trata de limos y arcillas (Figura 64). Las partículas de mayor tamaño se aprecian angulosas y de baja esfericidad. Se distinguen algunos cristales de biotita. Se considera en estado inmaduro composicionalmente. El color del material es marrón oscuro, utilizando la clasificación de Munsell se le asigna un color 7.5YR3/1.



Figura 64. Muestra M09 en lupa

El material de la muestra M10 son un agregado mineral en matriz arcillosa, granos angulosos a subangulosos de baja esfericidad. Tamaño variado que va de $\frac{1}{2}$ mm de diámetro a menores de $\frac{1}{8}$ de mm de diámetro. El material está de mal a moderadamente clasificado. Se alcanza a distinguir cristales de biotita y cuarzos, estos últimos muy pequeños (Figura 65). El color del material es marrón con una coloración rojiza, de acuerdo con la clasificación de Munsell es 10YR4/6.



Figura 65. Muestra M10 en lupa

La muestra M11 se conforma de terrones o agregados (Figura 66), se comporta como plastilina, por lo que se atribuye a un alto contenido de arcillas, por ello se clasifica el material dentro de un estado inmaduro composicionalmente. El material se encuentra moderadamente bien clasificado, se alcanzan a observar algunos fragmentos de cristales aislados posiblemente cuarzo. Los granos son de tamaños menores a $\frac{1}{4}$ de mm de diámetro, angulosos de baja esfericidad. El color del material de acuerdo con la clasificación de Munsell es 5YR3/2.

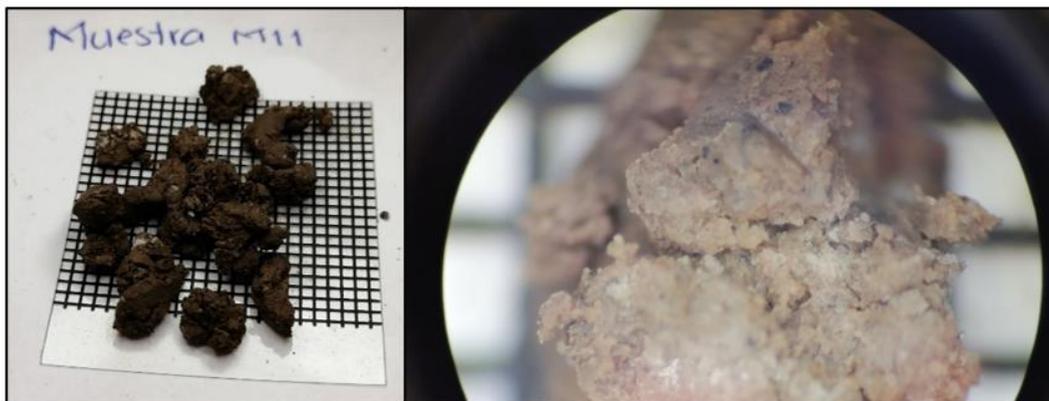


Figura 66. Muestra M11 en lupa

El material de la muestra M12 se encuentra mal clasificada, ya que se observan granos de tamaños mayores de 1 mm de diámetro y otros menores a $\frac{1}{4}$ de mm de diámetro. Los granos son angulosos a subangulosos de baja esfericidad, alrededor de un 30 % del material (los granos más grandes) son redondeados. Se encuentran en un estado inmaduro texturalmente y en un estado moderadamente maduro a inmaduro composicionalmente ya que se observan cristales de cuarzo, ferromagnesianos y en menor medida de plagioclasas y feldespatos. El color del material es café oscuro, según la clasificación de Munsell es 5YR2.5/2 (Figura 67).



Figura 67. Muestra M12 en lupa

La muestra 13 es un material mal clasificado, de color grisáceo de acuerdo con la clasificación de Munsell es 10YR3/2 estando el material húmedo y 10YR5/1 estando seco, con granos de más de 1 cm de diámetro (Figura 68), así como partículas finas menores a $\frac{1}{8}$ de mm de diámetro. Se observan algunos cristales de cuarzo (cuarzo lechoso principalmente), y algunos cristales con brillo metálico, posible galena. Los fragmentos del material en su mayoría son subangulosos de baja esfericidad. Se encuentra en un estado inmaduro texturalmente y submaduro a inmaduro composicionalmente.



Figura 68. Muestra M13 en lupa

E. Granulometría

En las siguientes tablas se muestra el porcentaje que pasó de material por cada malla, así como las gráficas de cada muestra.

Tabla E26. Porcentaje que pasa cada malla Muestra M00 a M04

MALLA	PORCENTAJE QUE PASA CADA MALLA				
	M00	M01	M02	M03	M04
2" (58.8 mm)	100.00%	99.99%	99.29%	99.83%	99.84%
1" (25.40 mm)	100.00%	87.43%	95.73%	99.83%	99.84%
3/4" (19.10 mm)	100.00%	87.43%	95.72%	94.98%	99.84%
1/2" (12.70 mm)	100.00%	82.12%	95.67%	81.17%	99.84%
3/8" (9.52 mm)	100.00%	78.01%	94.02%	73.35%	98.49%
No. 4 (4.75 mm)	100.00%	64.43%	86.41%	42.71%	89.60%
No. 10 (2.00 mm)	100.00%	53.14%	81.78%	35.56%	89.34%
No. 20 (0.841 mm)	100.00%	46.23%	77.64%	31.96%	87.33%
No. 40 (0.40mm)	99.74%	39.12%	71.09%	28.26%	80.40%
No. 60 (0.25 mm)	75.65%	31.86%	64.95%	25.52%	74.42%
No. 100 (0.077 mm)	20.35%	25.64%	58.60%	22.86%	62.12%
No. 200 (0.074 mm)	2.68%	20.22%	52.63%	17.79%	49.65%

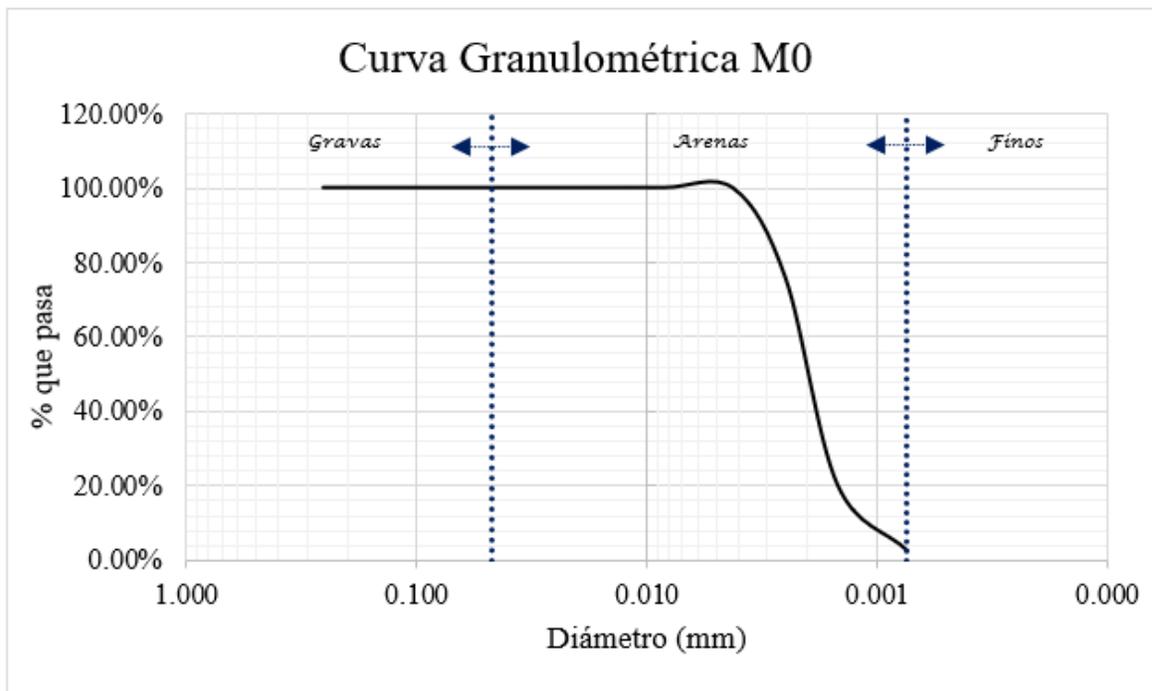
Tabla E27. Porcentaje que pasa cada malla Muestra M04B a M08

MALLA	PORCENTAJE QUE PASA CADA MALLA				
	M04B	M05	M06	M07	M08
2" (58.8 mm)	100.00%	99.60%	99.91%	99.68%	99.86%
1" (25.40 mm)	100.00%	99.60%	99.91%	99.68%	92.05%
3/4" (19.10 mm)	100.00%	99.60%	99.91%	99.68%	89.37%
1/2" (12.70 mm)	100.00%	99.26%	99.91%	99.42%	84.27%
3/8" (9.52 mm)	99.33%	98.18%	99.58%	99.16%	80.52%
No. 4 (4.75 mm)	83.07%	92.50%	89.25%	91.98%	66.01%
No. 10 (2.00 mm)	79.65%	79.26%	88.33%	90.43%	43.64%
No. 20 (0.841 mm)	75.98%	73.85%	86.71%	88.71%	33.72%
No. 40 (0.40mm)	71.38%	66.92%	77.30%	86.79%	31.11%
No. 60 (0.25 mm)	67.03%	57.03%	70.35%	84.46%	29.21%
No. 100 (0.077 mm)	60.18%	44.70%	65.32%	81.16%	27.21%
No. 200 (0.074 mm)	50.72%	30.30%	59.32%	73.95%	24.79%

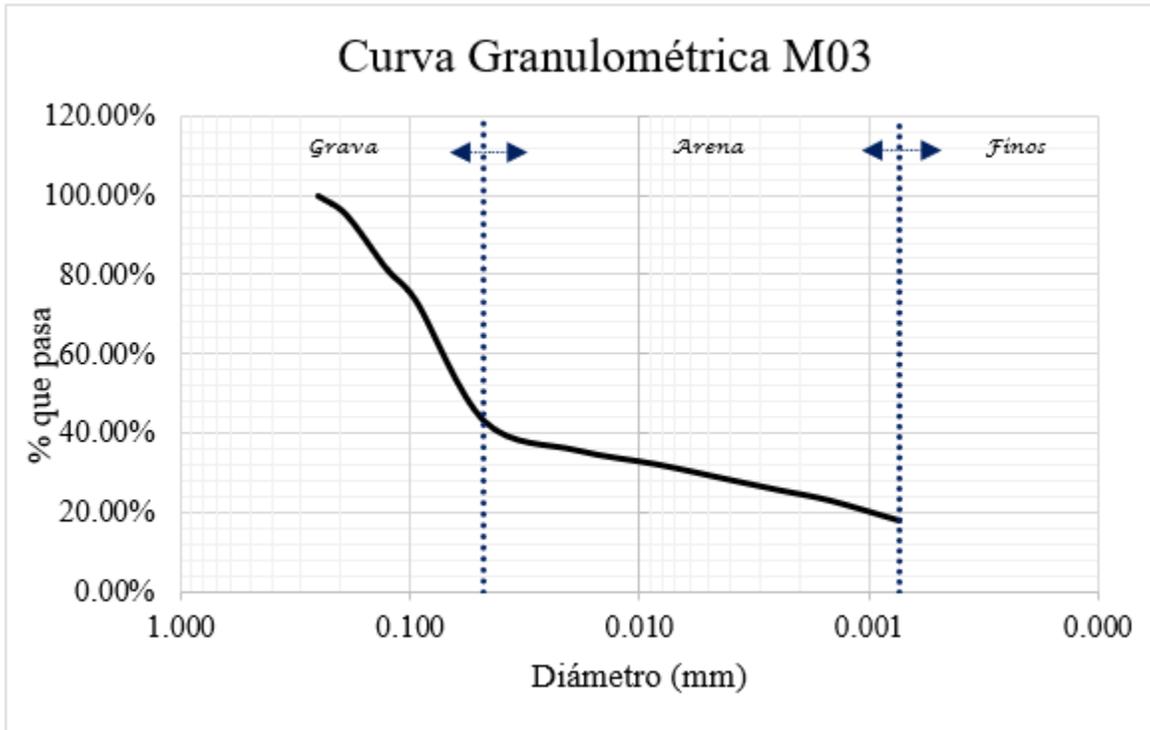
Tabla E28. Porcentaje que pasa cada malla Muestra M09 a M13

MALLA	PORCENTAJE QUE PASA CADA MALLA				
	M09	M10	M11	M12	M13
2" (58.8 mm)	99.96%	99.94%	99.95%	99.85%	99.99%
1" (25.40 mm)	99.96%	99.94%	99.95%	99.85%	99.99%
3/4" (19.10 mm)	99.96%	98.76%	99.95%	99.85%	95.82%
1/2" (12.70 mm)	99.96%	96.86%	99.95%	95.01%	95.02%
3/8" (9.52 mm)	99.96%	95.61%	99.95%	92.35%	94.39%
No. 4 (4.75 mm)	97.62%	88.91%	98.71%	85.21%	90.13%
No. 10 (2.00 mm)	97.41%	82.98%	97.79%	78.52%	87.92%
No. 20 (0.841 mm)	97.10%	79.54%	96.59%	71.26%	85.91%
No. 40 (0.40mm)	96.24%	66.39%	94.08%	60.27%	81.98%
No. 60 (0.25 mm)	94.63%	48.11%	90.73%	47.65%	77.79%
No. 100 (0.077 mm)	92.26%	38.82%	87.32%	36.83%	73.68%
No. 200 (0.074 mm)	87.67%	32.18%	82.66%	26.46%	68.90%

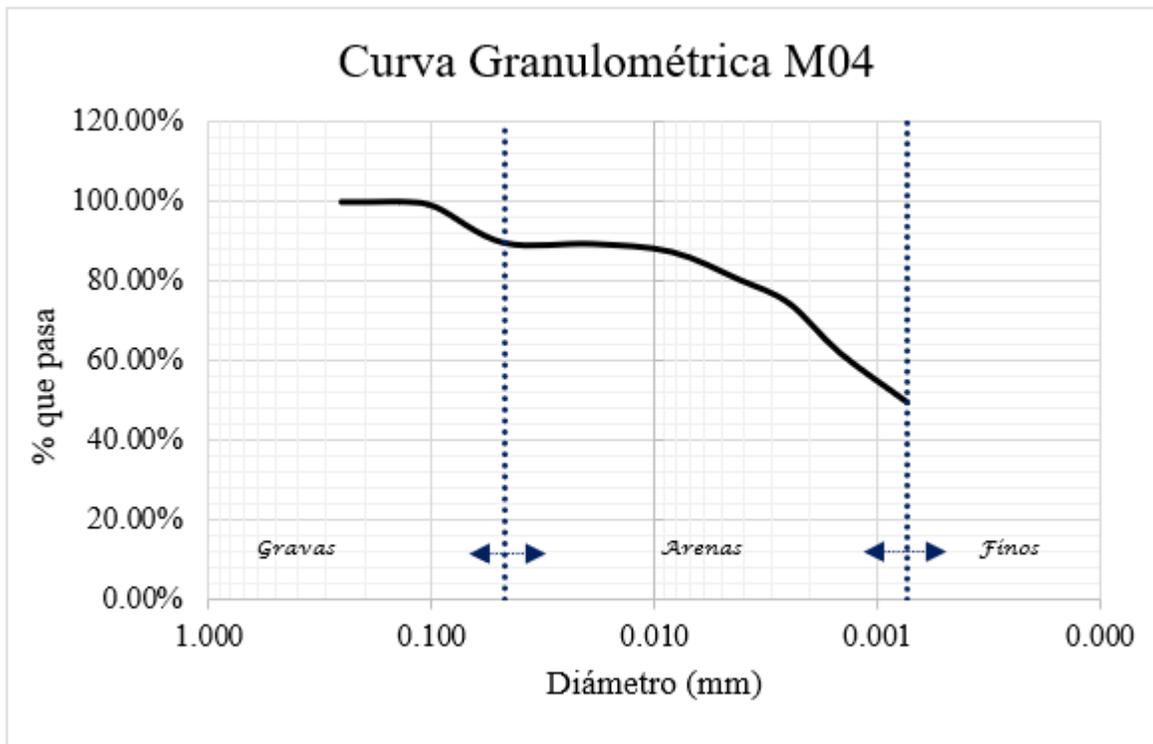
A continuación, se muestran las curvas granulométricas para cada una de las muestras analizadas, donde se compara el porcentaje de material que pasa cada malla contra el diámetro de la partícula.



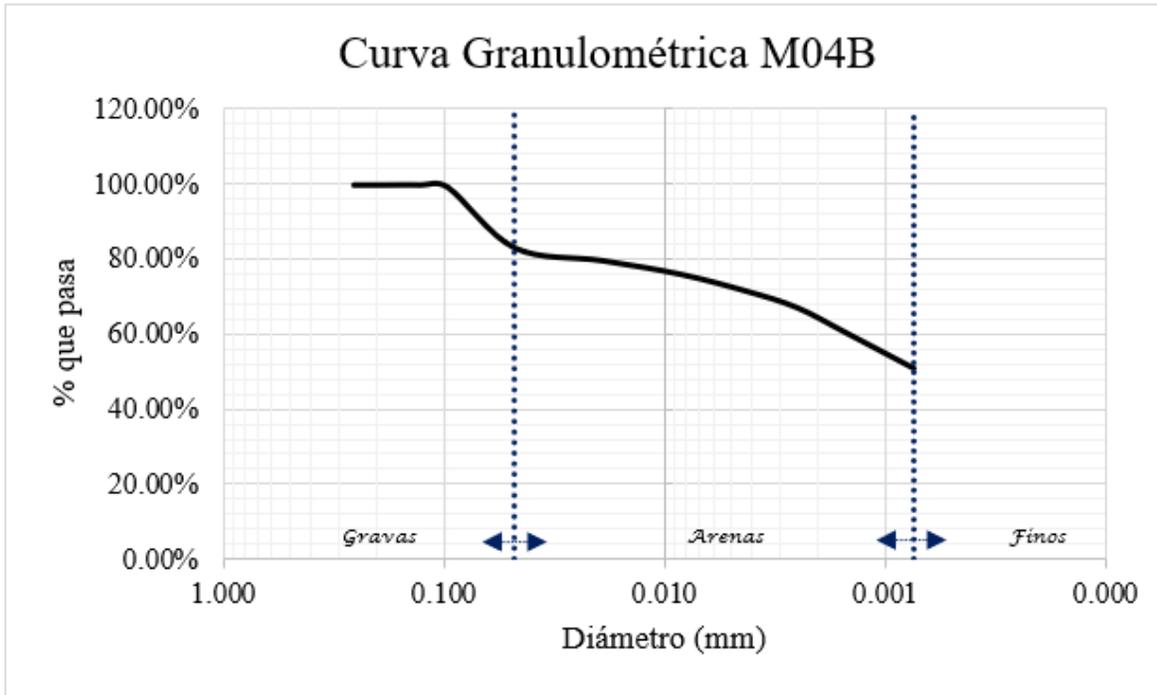
Gráfica 1E. Curva granulométrica M00



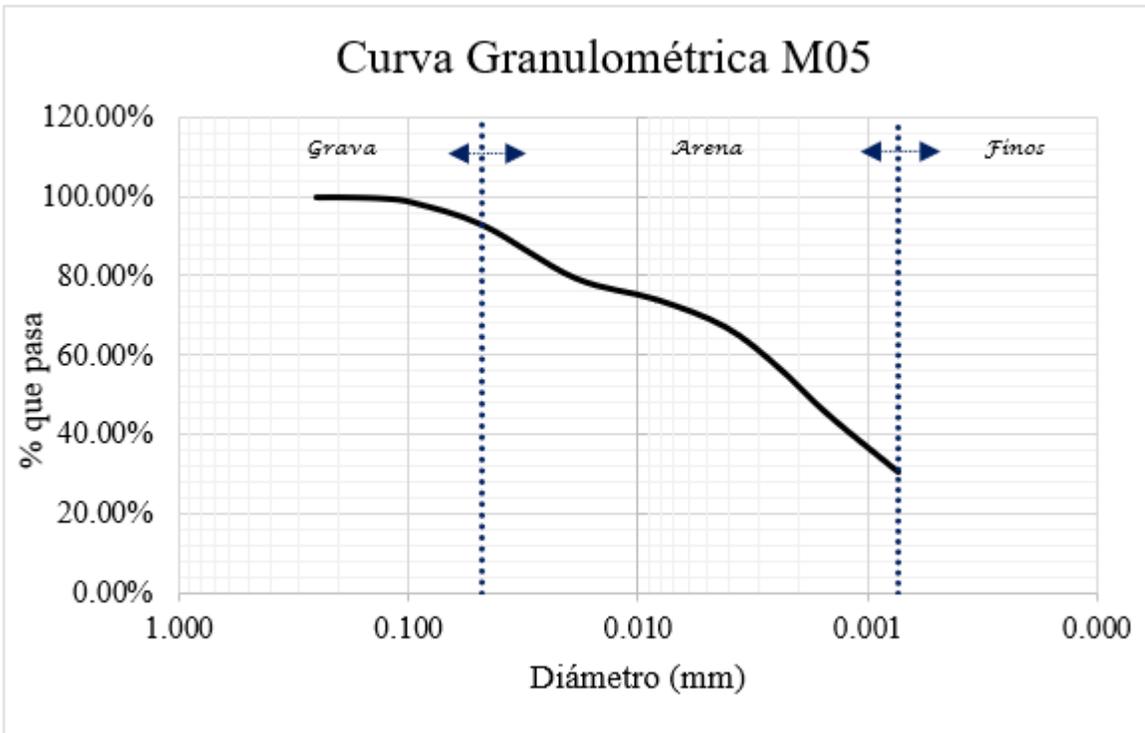
Gráfica 4E. Curva granulométrica M03



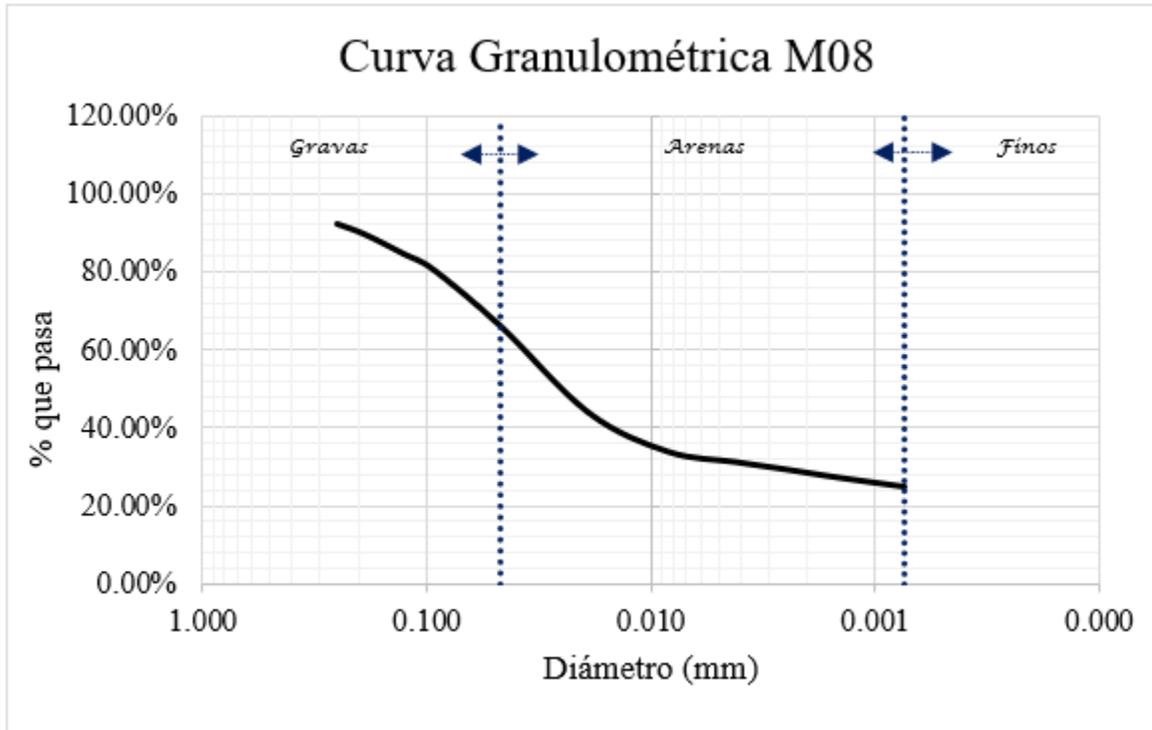
Gráfica 5E. Curva granulométrica M04



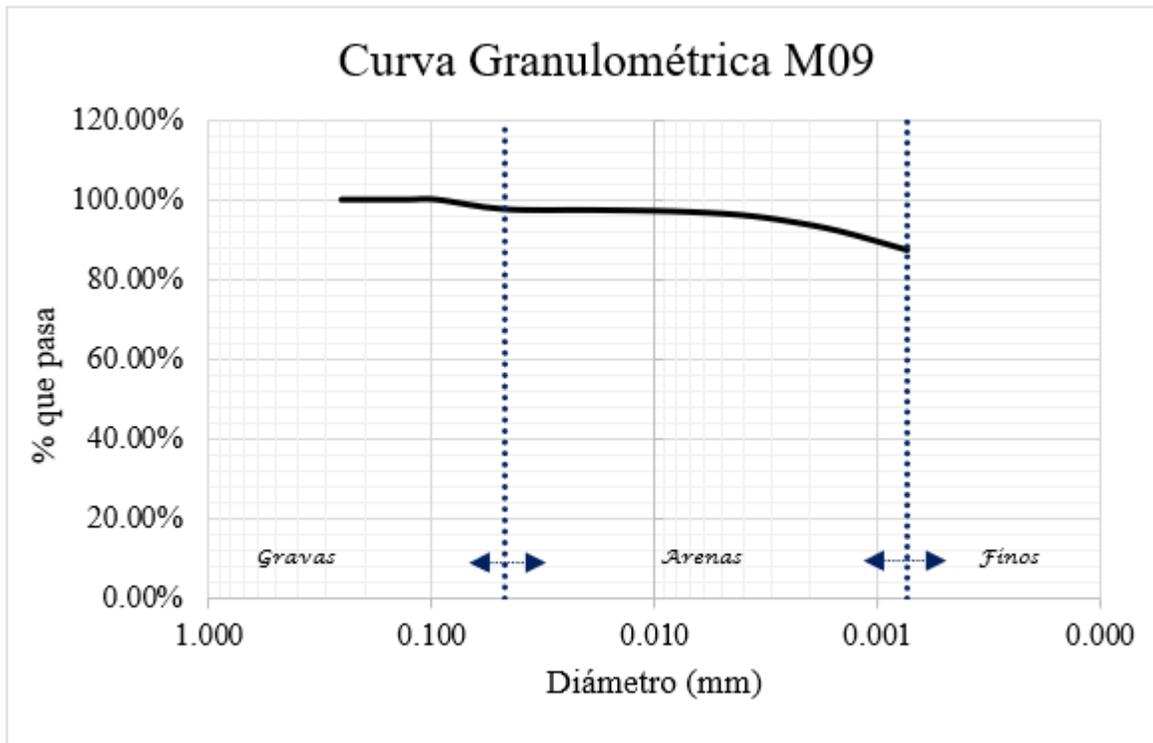
Gráfica 6E. Curva granulométrica M04B



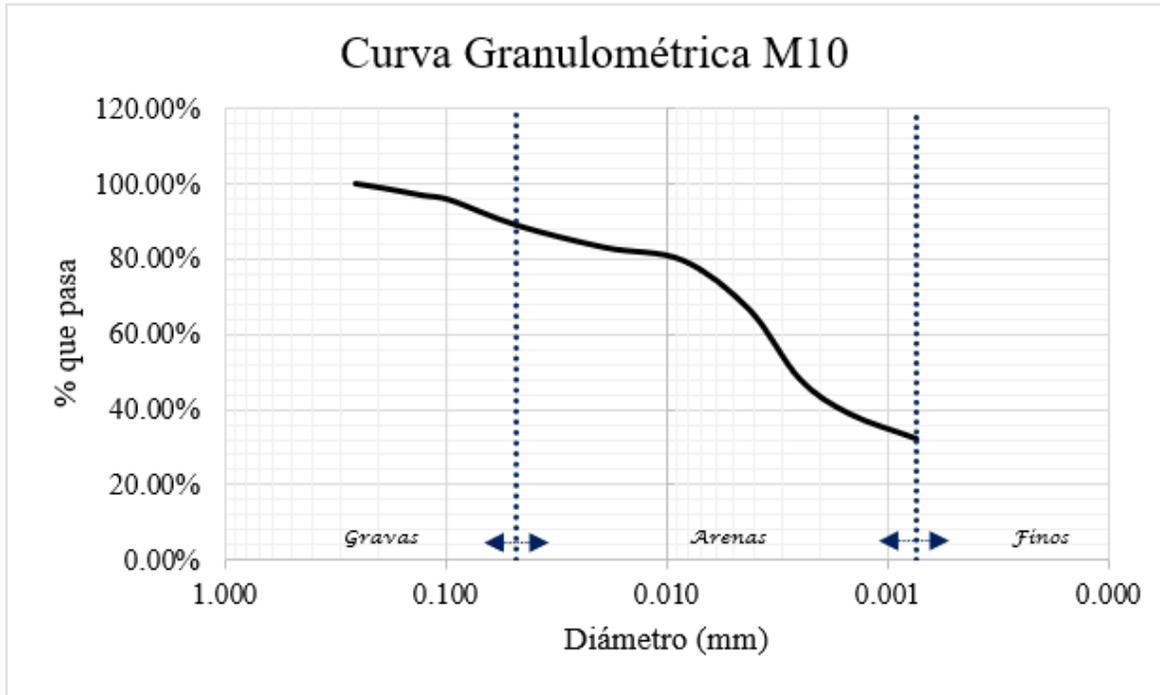
Gráfica 7E. Curva granulométrica M05



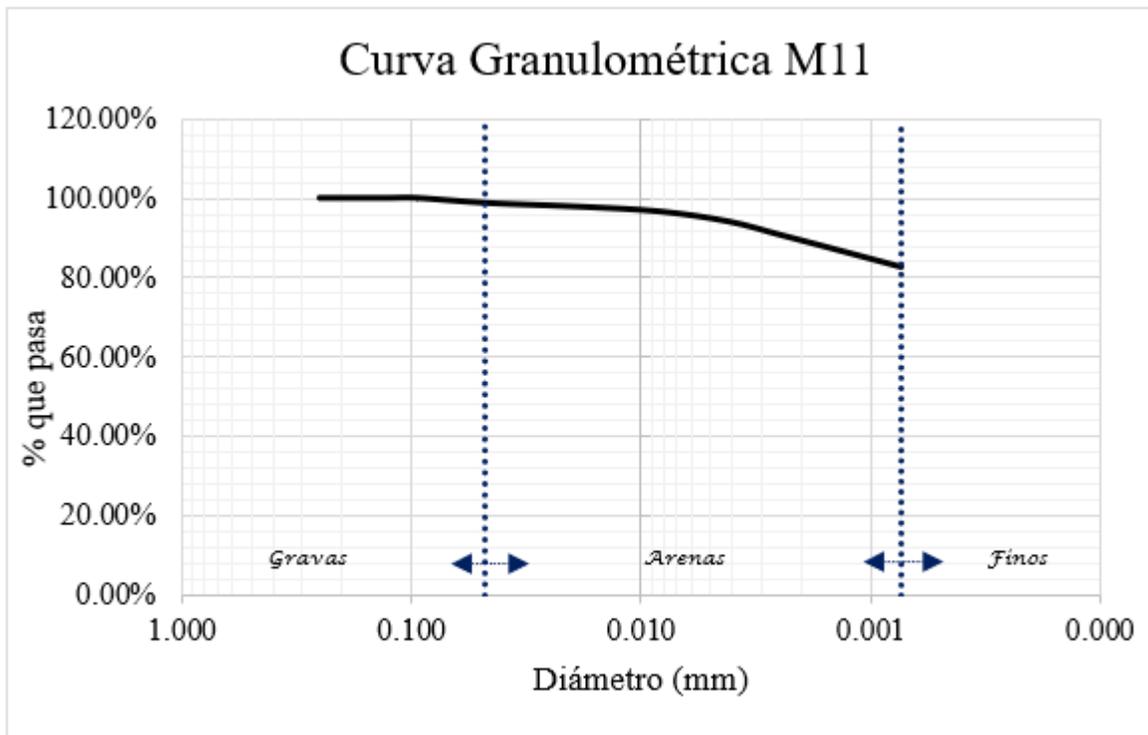
Gráfica 10E. Curva granulométrica M08



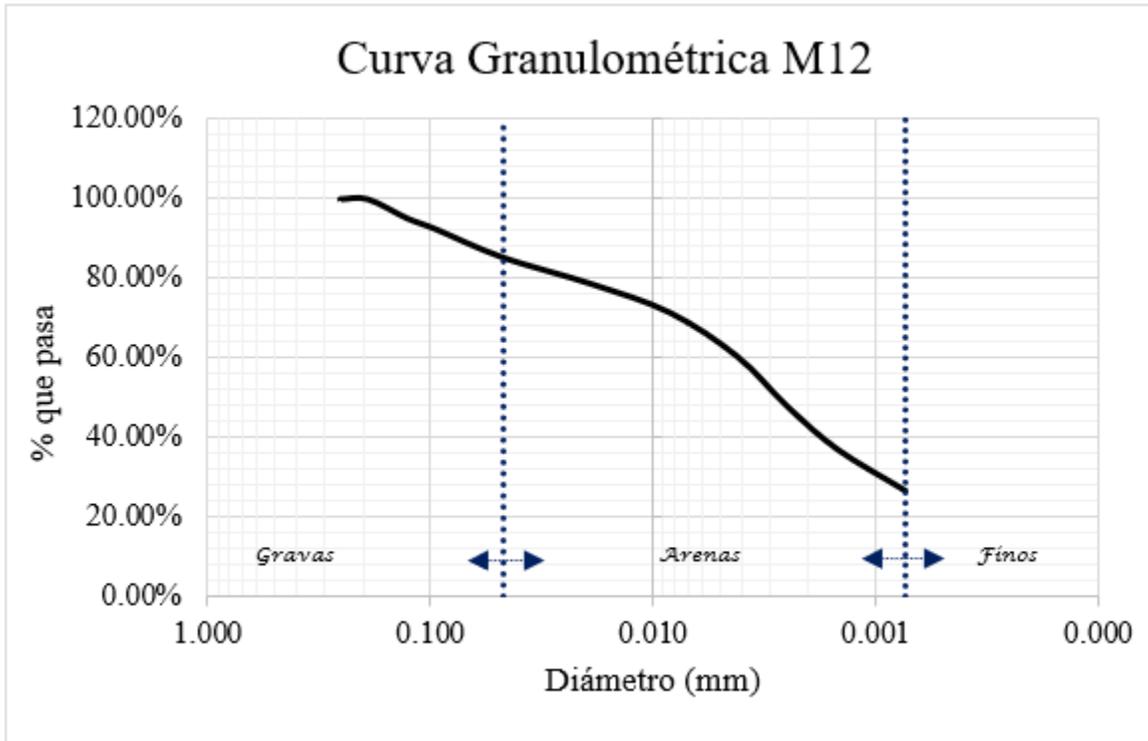
Gráfica 11E. Curva granulométrica M09



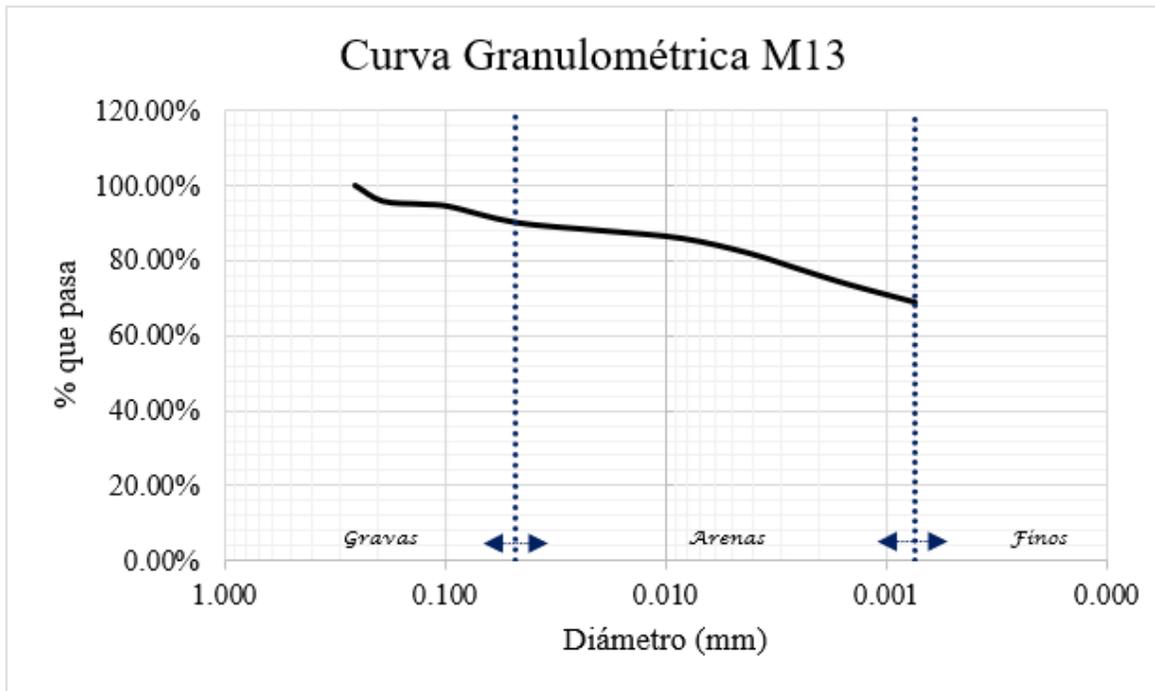
Gráfica 12E. Curva granulométrica M10



Gráfica 13E. Curva granulométrica M11



Gráfica 14E. Curva granulométrica M12



Gráfica 15E. Curva granulométrica M13

F. Permeabilidad

Los datos utilizados para el cálculo previos a las pruebas de permeabilidad se indican en la Tabla 1F, así como los valores obtenidos a partir de las pruebas.

Tabla F29. Datos de preparación para pruebas de permeabilidad

Muestra	Número de golpes	Peso de material (g)	Contenido de humedad (%)	Volumen de la muestra (cm ³)	ρ_m	τd seco (parafina)	τd seco (calculado)	Porcentaje de variación (τd seco)
M01	10 golpes	1672.8	5.0	961.42	1.74	1.62	1.66	2.1%
M02	15 golpes	1537.2	17.9	961.42	1.60	1.40	1.36	3.1%
M03	6 golpes	1696.4	11.3	961.42	1.76	1.53	1.58	3.6%
M04	5 golpes	1253.9	21.6	817.21	1.53	1.23	1.26	2.3%
M04B	20 golpes	1497.5	13.5	961.42	1.56	1.32	1.37	3.8%
M05	5 golpes	1663	8.4	961.42	1.73	1.54	1.60	3.8%
M06	25 golpes	1688.4	19.9	961.42	1.76	1.48	1.46	0.9%
M07	10 golpes	1545.9	20.0	961.42	1.61	1.33	1.34	0.5%
M08	4 golpes	1660.6	11.7	961.42	1.73	1.49	1.55	3.6%
M09	6 golpes	1429.9	35.3	961.42	1.49	1.13	1.10	2.6%
M10	10 golpes	1665.1	14.4	961.42	1.73	1.47	1.51	3.3%
M11	6 golpes	1544.3	35.8	961.42	1.61	1.17	1.18	1.2%
M12	5 golpes	1665.6	14.8	961.42	1.73	1.45	1.51	3.9%
M13	5 goles	1312	23.3	961.42	1.36	1.13	1.11	2.4%

Tabla F30. Cálculo de coeficiente de permeabilidad

Muestra	Tiempo (s)	Volumen (cm³)	h (cm de C-H₂O)	Área (cm²)	Longitud (cm)	A. Permeabilidad k (cm/s)
M00	121.4	405	101.97	31.17	8.90	9.34E-03
M01-BV	3235.82	500	1021.00	31.17	8.90	4.32E-05
M02-BV	4500.50	375.00	1021.00	31.17	8.90	2.33E-05
M03-BV	1200	110.000	1021.00	31.17	8.90	2.56E-05
M04-C	7200.72	136.000	1021.00	31.17	8.90	5.28E-06
M04B-C	6329.53	95.000	1021.00	31.17	8.90	4.20E-06
M05-C	422.29	325.000	1021.00	31.17	8.90	2.15E-04
M06-C	904.35	235.000	1021.00	31.17	8.90	7.27E-05
M07-C	602.23	72.000	1021.00	31.17	8.90	3.34E-05
M08-C	1894.33	350.000	1021.00	31.17	8.90	5.17E-05
M09-MD	7200.00	83.000	1021.00	31.17	8.90	3.22E-06
M10-MD	5400.00	302.000	1021.00	31.17	8.90	1.56E-05
M11-MD	360.46	388.000	1021.00	31.17	8.90	3.01E-04
M12-MD	1233.57	135.000	1021.00	31.17	8.90	3.06E-05
M13-MD	600.46	220.000	1021.00	31.17	8.90	1.02E-04

G. Análisis químico de lixiviados

Tabla G31. Resultados de análisis químico de lixiviados del Laboratorio de Sanitaria.

Parámetro	Muestras																Base BV	Base MDC
	Buenaventura				Cuauhtémoc						Meoqui Delicias							
	M00	M01	M02	M03	M04	M04 B	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13			
pH	7.6	7.6	7.39	7.7	7.6	7.4	7.54	6.8	7.6	6.5	7.2	7.5	7.1	7.3	7.2	5.48	5.1	
Alcalinidad Total (mg/L)	358.4	112	78.1	86.4	139.4	129.3	33.5	13.9	172.0	5.6	237	136.7	78.1	106	128.3	5.6	2.8	
CE	1047	488	5590	1818	1622	2190	417	4910	1052	1478	2050	1313	2860	1390	2150	50	4.7	
Dureza total	574.3	104.9	3008.0	1222	187	846	290.8	3853.99	752.0	575.8	920.9	658.0	3102	1316	1410	0	0	
Bicarbonatos (mg/L)	437.2	136.6	95.24	105.5	120.1	129.3	40.8	17.1	210.8	6.83	289.1	166.7	95.2	129.3	156.5	6.8	3.4	
Carbonatos (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Flúor (mg/L)	4.16	2.98	2.48	1.7	2.57	3.25	0.08	1.38	1.25	0.14	5.39	3.53	5.92	1.47	2.25	0	0	
Fierro (mg/L)	<0.1	0.32	0.25	<0.1	0.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	4.93	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
Calcio (mg/L)	175.6	31.4	798.1	263.5	61.8	150.6	93.9	1016.4	188.2	183.6	255.9	112.9	677.6	414.1	564.7	0	0	
Magnesio (mg/L)	33	6.41	246.53	136.96	7.94	114.13	13.7	319.57	68.48	28.5	68.48	91.31	342.4	68.48	0	0	0	
Sodio (mg/L)	15.0	56.5	835.5	185.3	285.3	282.4	18.38	757	72.63	38.57	811.9	275.6	256.6	63.72	160.4	0	0	
Potasio (mg/L)	3.09	20.08	27.56	106.4	35.86	95.23	6.81	221.5	155.2	17.11	27.56	1.01	26.65	77.56	56.55	0	0	
Cloruros (mg/L)	11.7	7.06	1029.5	30.42	159.1	393.1	4.68	156.76	18.72	13.1	154.4	42.11	56.15	0	117	0	0	
Sulfatos (mg/L)	37.2	15.8	657.36	12.4	18.6	37.21	48.84	341.09	95.5	12.4	99.22	276	948.8	376.2	167.4	0.74	0.62	
Nitratos (mg/L)	272.4	92.3	1424.8	846.1	348.4	315.6	181.9	4638.2	297.7	768.7	197.1	93.6	704.5	80.6	1005.5	1.1	0.92	

Tabla G32. Resultados de análisis químico de lixiviados SGM (Parte 1)

Elemento/Compuesto		Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Cl-	Co	Cr	Cu
U n i d a d e s		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Límites de detección		0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.1	0.001	1.0	0.001	0.001	0.001
Tipo de muestra	ID												
AGUA	M00	<0.001	0.008	0.012	0.037	<0.001	<0.001	34.4	<0.001	7	0.006	0.001	0.010
AGUA	M01	<0.001	4.289	0.002	0.032	<0.001	<0.001	18.6	<0.001	9	0.003	0.002	0.006
AGUA	M02	<0.001	<0.001	0.008	0.065	<0.001	<0.001	330.9	<0.001	305	0.042	<0.001	0.008
AGUA	M04	<0.001	10.116	0.154	0.082	0.001	<0.001	14.1	<0.001	26	0.004	0.007	0.020
AGUA	M04B	<0.001	0.001	0.054	0.066	<0.001	<0.001	40.9	0.001	165	0.006	0.003	0.004
AGUA	M09	<0.001	0.014	0.130	0.026	<0.001	<0.001	138.1	<0.001	150	0.017	<0.001	0.015
AGUA	M10	<0.001	0.004	0.037	0.020	<0.001	<0.001	45.4	0.001	7	0.007	0.001	0.006
AGUA	M11	<0.001	<0.001	0.048	0.017	<0.001	<0.001	613.9	0.001	42	0.080	<0.001	0.009

Tabla G33. Resultados de análisis químico de lixiviados SGM (Parte 2)

Elemento/Compuesto		F-	Fe	K	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	NO3-	P	Pb	Sb
U n i d a d e s		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Límites de detección		0.01	0.001	0.1	0.1	0.001	0.001	0.1	0.001	1.0	0.001	0.001	0.001
Tipo de muestra	ID												
AGUA	M00	1.50	0.045	19.4	7.6	0.002	0.003	5.0	0.012	<1	0.345	<0.001	0.001
AGUA	M01	3.78	3.979	5.5	4.2	0.037	0.006	30.6	0.003	12	0.374	0.001	<0.001
AGUA	M02	1.49	0.001	17.8	82.6	0.001	0.010	304.6	0.010	29	0.075	<0.001	<0.001
AGUA	M04	1.72	9.171	6.4	4.1	0.080	0.005	106.3	0.005	<1	0.240	0.005	0.003
AGUA	M04B	4.22	<0.001	14.2	24.8	<0.001	0.030	153.4	0.001	69	0.207	<0.001	0.002
AGUA	M09	6.56	0.017	5.8	19.0	<0.001	0.023	477.8	0.001	81	0.046	<0.001	0.001
AGUA	M10	3.88	0.003	0.1	5.0	<0.001	0.034	180.7	0.001	14	0.210	<0.001	0.001
AGUA	M11	6.16	<0.001	9.3	270.4	<0.001	0.033	210.4	0.005	102	0.056	<0.001	0.003

Tabla G34. Resultados de análisis químico de lixiviados SGM (Parte 3)

Elemento/Compuesto		Sc	Se	Sn	SO4	Sr	Te	Ti	TI	U	V	W	Zn
Unidades		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Límites de detección		0.001	0.001	0.001	0.1	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Tipo de muestra	ID												
AGUA	M00	0.004	<0.001	0.004	18.5	0.215	<0.001	0.099	<0.001	<0.001	0.013	0.001	<0.001
AGUA	M01	0.006	<0.001	0.001	13.7	0.096	<0.001	0.209	<0.001	0.001	0.015	0.001	0.015
AGUA	M02	0.004	0.061	<0.001	964	3474	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.011	0.001	<0.001
AGUA	M04	0.017	0.019	0.001	86.2	0.09	<0.001	1073	<0.001	0.005	0.05	0.003	0.048
AGUA	M04B	0.005	0.034	<0.001	170.8	0.815	<0.001	<0.001	<0.001	0.012	0.027	0.001	<0.001
AGUA	M09	0.004	<0.001	<0.001	998	1781	<0.001	0.054	<0.001	0.009	0.087	0.001	<0.001
AGUA	M10	0.008	<0.001	<0.001	320	0.599	<0.001	<0.001	<0.001	0.027	0.048	0.002	<0.001
AGUA	M11	0.002	<0.001	0.001	2288	12.65	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.017	<0.001	<0.001