



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA

“Disponibilidad de metales traza en suelos y agua de la comunidad de Capula, Michoacán”

TESIS:

Para obtener el grado en:

MAESTRA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

PRESENTA:

Geol. Valeria González Miranda

Director de tesis:

Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera

Morelia, Mich., Agosto 2018



AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra por permitirme continuar aprendiendo y preparándome y de darme la oportunidad de conocer a excelentes profesores y alumnos.

Al CONACyT por el apoyo otorgado con el cual pude concretar el presente proyecto.

A la Dirección local de CONAGUA: M.C. Silvia Yolanda Gómez Orozco, Jefa del laboratorio; I.Q. Juan Rangel Camarena, Jefe del Departamento de Calidad del Agua y el Ing. Oswaldo Rodríguez Gutiérrez, Director Local de CONAGUA

Al laboratorio de Edafología (Edificio B-4) de la facultad de Biología de la UMSNH por permitirme realizar mis análisis de suelos.

Al Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera por su asesoría y apoyo para el desarrollo de este trabajo.

Un agradecimiento especial a la Dra. María Alcalá de Jesús, por estar siempre al pendiente del avance del proyecto y por apoyarme cada vez que lo necesitaba.

A los integrantes de mi mesa de sinodales: Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva, Dr. Luis Rafael Olmos Navarrete, Dra. Isabel Israde Alcántara y la Dra. Lourdes González Arqueros por su dedicación en la revisión de este trabajo y sus sugerencias para mejorarlo.

Al laboratorio de Química y su equipo de trabajo por el apoyo en la medición de los metales pesados y su espacio en el laboratorio para la digestión de las muestras.

A la Dra. Erna Martha López Granados por aconsejarme y escucharme cada vez que lo necesité, además de contar siempre con su apoyo como una excelente profesionista y buena amiga.

A mis compañeros Efraín, Alberto, Juan Carlos y Juan Luis por apoyarme en todas las salidas al campo durante los dos años del posgrado.

A mis compañeros y amigos de la maestría: Leslly, Mónica, Javier y Yoselin por ser parte esencial de mi vida en este trayecto.

A mi familia: mi mamá, mi abuelita, mis hermanos y toda la familia que siempre me apoyó para lograr cumplir esta meta y que hoy, finalmente, lo he logrado.

A mis amigas del TRX, que a pesar de no estar involucradas en el proyecto, siempre conté con ellas día con día, las quiero Gaby, Betty, Sami, Mayra, Odette.

Un agradecimiento especial al M.C. José Andrés Martínez Trejo que estuvo a mi lado para apoyarme, aconsejarme y asesorarme en todo momento. Gracias por tu compromiso, este trabajo lo sacamos los dos.

Y a mí, a mí por no darme por vencida a pesar de las adversidades y por demostrarme que con mucho esfuerzo, amor y dedicación, puedo lograrlo a pesar de las dificultades que se presenten.

“Nunca te vas a equivocar de camino si cada paso lo das con amor”

Abreviaturas

As	Arsénico
AAS	Espectrometría de Absorción Atómica
Ba	Bario
Cd	Cadmio
C.E.	Conductividad Eléctrica
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
Cr	Cromo
Cu	Cobre
CVTM	Cinturón Volcánico Trans-Mexicano
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
EPA	Enviromental Protection Agency
F	Flúor
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
Fe	Hierro
FONART	Fondo Nacional para el Fomento de las Artesanías
Hg	Mercurio
I	Iodo
ICA	Índice de Calidad del Agua
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
Li	Litio
Mn	Manganeso
M.O.	Materia orgánica
msnm	Metros sobre el nivel del mar
Ni	Níquel
NOM	Norma Oficial Mexicana
OD	Oxígeno Disuelto
OMS	Organización Mundial de la Salud
P	Fosforo
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIA	Según Instrumento A utilizar
V	Vanadio
WRI	World Resource Institute
Zn	Zinc

ÍNDICE

Contenido	Página
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Justificación	8
1.2. Hipótesis	8
1.3. Objetivos	9
1.3.1. Objetivo general	9
1.3.2. Objetivos particulares	9
1.4. Antecedentes	10
1.4.1. Contaminación por metales pesados en México	10
1.4.2. Contaminación de las aguas subterráneas por actividad antropogénica en Morelia	12
1.4.3. Metales pesados en suelos , sedimentos y agua de la cuenca del Lago de Cuitzeo	13
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1. El agua.....	17
2.1.1. Distribución del agua en el mundo	17
2.1.2. El agua en México	18
2.1.3. El agua en Michoacán	20
2.2. Calidad del agua.....	20
2.2.1. Calidad del agua en Morelia.....	21
2.2.2. Parámetros físicos y químicos del agua	22
2.2.2.1. Temperatura	22
2.2.2.2. pH	23
2.2.2.3. Conductividad eléctrica.....	23
2.2.2.4. Oxígeno Disuelto	23
2.2.2.5. Demanda Bioquímica de Oxígeno	24
2.2.2.6. Dureza total	24
2.2.2.7. Constituyentes mayores	24

2.2.2.7.1. Cloruros	25
2.2.2.7.2. Sulfatos	25
2.2.2.7.3. Nitratos	25
2.3. Suelos.....	26
2.3.1. Tipos de suelos en la cuenca del Lago de Cuitzeo	26
2.3.2. Parámetros físicos y químicos del suelo	27
2.3.2.1. Textura.....	27
2.3.2.2. pH	28
2.3.2.3. Conductividad eléctrica.....	28
2.4. Contaminación	29
2.4.1. Contaminación del agua.....	29
2.4.2. Fuentes de contaminación del agua.....	29
2.4.3. Contaminación del suelo	30
2.4.4. Fuentes de contaminación del suelo	30
2.4.5. Normas Oficiales Mexicanas	31
2.4.6. Perspectivas nacionales y locales	32
2.5. Metales pesados.....	34
2.5.1. Arsénico (As)	34
2.5.2. Cobre (Cu).....	35
2.5.3. Zinc (Zn)	36
2.5.4. Hierro (Fe)	36
2.5.5. Disponibilidad	37
2.6. Espectroscopia de Absorción Atómica.....	40
3. ÁREA DE ESTUDIO	41
3.1. Localización geográfica	42
3.2. Orografía y fisiografía	43
3.3. Hidrología	45
3.4. Geología	46
3.5. Suelos.....	48
3.6. Clima.....	49
3.7. Cobertura y uso de suelo.....	49

4. METODOLOGÍA Y ZONAS DE MUESTREO	51
4.1. Zonas de muestreo	53
4.2. Toma de muestras	56
4.2.1. Toma de muestras de agua.....	56
4.2.1.1. Parámetros bacteriológicos	56
4.2.1.2. Parámetros físicos y químicos y metales pesados	58
4.2.2. Toma de muestras de suelo	60
4.3. Material y equipo.....	61
4.4. Análisis de parámetros	61
4.4.1. Análisis de parámetros físicos y químicos de agua <i>in situ</i>	61
4.4.2. Análisis de parámetros físicos y químicos de agua en laboratorio.....	61
4.4.3. Análisis de parámetros físicos y químicos en suelos.....	62
4.4.4. Análisis de metales pesados en aguas residuales y suelos	62
4.4.4.1. Digestión ácida de aguas residuales	63
4.4.4.2. Digestión ácida para muestras de suelo	64
4.4.4.3. Determinación de metales pesados (MP) y arsénico.....	66
4.5. Análisis estadístico	67
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70
5.1. Parámetros físicos y químicos del agua	71
5.1.1. Temperatura	72
5.1.2. Conductividad eléctrica	73
5.1.3. pH.....	74
5.1.4. Oxígeno Disuelto (OD)	75
5.1.5. Dureza total	76
5.1.6. Demanda Bioquímica de Oxígeno	77
5.1.7. Concentración de Cloruros, Sulfatos y Nitratos	78
5.2. Índice de Calidad del Agua (ICA).....	80
5.3. Elementos traza en agua	86
5.3.1. Arsénico en agua.....	87
5.3.2. Cobre en agua.....	88

5.3.3. Zinc en agua.....	89
5.3.4. Hierro en agua.....	90
5.4. Análisis estadístico de componentes principales para agua.....	91
5.5. Resultados físicos y químicos del suelo	94
5.5.1. Humedad en suelo	95
5.5.2. pH en suelo	96
5.5.3. Conductividad eléctrica en suelo	97
5.5.4. Clase textural de los suelos.....	99
5.6. Elementos traza en suelos.....	101
5.7. Disponibilidad de elementos traza	117
6. CONCLUSIÓN.....	123
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
8. ANEXOS.....	138
Anexo 1.....	139

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 1. Normas Oficiales Mexicanas utilizadas	31
Tabla 2. Concentraciones máximas permitidas en el agua según su uso de acuerdo a las normas mexicanas	32
Tabla 3. Valores de calidad promedio de suelos conservados en el valle Morelia-Queréndaro	33
Tabla 4. Toma, preservación y almacenamiento de muestras de agua potable de acuerdo a las Normas Mexicanas (NMX)	58
Tabla 5. Equipo utilizado en la determinación de los parámetros físicos y químicos y concentración de metales.....	61
Tabla 6. Normas Oficiales Mexicanas utilizadas en la determinación de los parámetros físicos y químicos del agua subterránea y residual muestreada.....	61

Tabla 7. Concentraciones máximas permitidas en el agua según su uso de acuerdo a las normas mexicanas	67
Tabla 8. Resultados físicos y químicos de las muestras de agua subterránea y residual	71
Tabla 9. . Valores de conductividad eléctrica de acuerdo a los diferentes tipos de agua (Orozco, 2003)	73
Tabla 10. Valores de pH de acuerdo a los diferentes tipos de agua (APHA; AWWA; WPCF, 1992)	74
Tabla 11. Clasificación de las aguas de acuerdo a la concentración de Oxígeno Disuelto (Orozco, 2003)	75
Tabla 12. Clasificación de las aguas de acuerdo a la dureza total (Orozco, 2003).....	76
Tabla 13. Clasificación de las aguas de acuerdo a la concentración de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (APHA; AWWA; WPCF, 1992).....	77
Tabla 14. Límites máximos permitidos para Cl, S, y N (SEMARNAT, 2005).....	78
Tabla 15. Parámetros físicos y químicos y su ponderación.....	81
Tabla 16. Fórmulas utilizadas para la determinación de los índices y su autor.....	82
Tabla 17. Tabla de resultados del Índice de Calidad del Agua	82
Tabla 18. Tabla de clasificación del ICA de acuerdo al criterio general	83
Tabla 19. Tabla comparativa entre los diferentes usos del agua de acuerdo al ICA (CONAGUA, 2005)	84
Tabla 20. Recomendaciones para las muestras de agua subterránea y residual de Capula, Mich.	84
Tabla 21. Valores de elementos traza en las muestras de agua subterránea y residuales en la comunidad de Capula, Mich	87
Tabla 22. Resultados de las propiedades fisicoquímicas de las muestras de suelo analizadas	94
Tabla 23. Clasificación de suelos según el pH (NOM-021-RECNAT-2000)	96
Tabla 24. Clasificación de suelos según la salinidad (conductividad eléctrica) (Vázquez, 1993).....	98

Tabla 25. Clase textural de las muestras de suelo	99
Tabla 26. Concentraciones de metales traza de las muestras de suelo	102
Tabla 27. Coordenadas geográficas de los pozos de extracción de agua subterránea muestreados.....	139
Tabla 28. Coordenadas geográficas de las descargas de aguas residuales	139
Tabla 29. Coordenadas geográficas de las muestras de suelo muestreadas	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Distribución del agua en el mundo (PNUMA, 2002)	17
Figura 2. Disponibilidad natural media per cápita por región hidrológico administrativa en 2010 (CONAGUA, 2012)	19
Figura 3. Esquema básico de absorción atómica.....	40
Figura 4. Ubicación regional del área de estudio	42
Figura 5. Ubicación y vías de comunicación del área de estudio	43
Figura 6. Principales elevaciones del área de estudio	44
Figura 7. Corriente principal que atraviesa la comunidad de Capula y la ubicación espacial de los pozos de agua subterránea muestreados....	45
Figura 8. Perfil estratigráfico de la zona de estudio (Tomado de Verduzco-Cedeño, 2010)	47
Tabla 9. Tipos de suelo del área de estudio de acuerdo a la carta edafológica de INEGI a escala 1:250 000	48
Figura 10. Cobertura y uso de suelo del área de estudio de acuerdo a la carta de Cobertura y uso de suelo de INEGI a escala 1:250 000.....	49
Figura 11. Esquema sintetizado de la metodología que se siguió en el trabajo	52
Figura 12. Localización de los pozos de extracción de agua subterránea y descargas de aguas residuales muestreados	53
Figura 13. Pozo de extracción de agua subterránea “Los artesanos” (P1-A), que abastece a la comunidad de Capula	54
Figura 14. Pozo de extracción de agua subterránea (P2-A), que abastece a	

las comunidades de Joyitas y San Bernabé	54
Figura 15. Pozo de agua privado (P3-A), para uso ganadero y de riego de plantas	55
Figura 16. Pozo de extracción de agua subterránea (P4-A), que abastece a las colonias 2 de Octubre, Barrio del prendimiento, San Francisco y Guadalupe.....	55
Figura 17. Pozo de extracción de agua subterránea (P5-A), que abastece a la comunidad de Buenavista	55
Figura 18. Pozo de extracción de agua subterránea (P6-A), que abastece a la comunidad de Iratzio	55
Figura 19. Descarga principal de aguas residuales de la comunidad de Capula (AR-1).....	55
Figura 20. Descarga de aguas residuales de la colonia 2 de Octubre (AR-2).....	55
Figura 21. Localización de los sitios donde se tomaron las muestras de suelo	56
Figura 22. Esterilización del tubo de agua para la toma de muestra.....	57
Figura 23. Toma de parámetros físicos y químicos <i>in situ</i>	59
Figura 24. Toma de muestras para la determinación de los parámetros físicos y químicos en laboratorio	59
Figura 25. Determinación de los parámetros físicos y químicos <i>in situ</i> de aguas residuales	59
Figura 26. Toma de muestra de suelo.....	60
Figura 27. 100 mL de agua residual en probeta.....	63
Figura 28. Trasvasar el agua de la probeta a un vaso de precipitados	63
Figura 29. Se toman 5 mL de ácido nítrico y 5 mL de ácido clorhídrico	63
Figura 30. Se coloca el ácido nítrico lentamente sobre la muestra de agua residual	63
Figura 31. Se coloca sobre una plancha hasta obtener 10 mL	64
Figura 32. Se filtran los 10 mL hasta su aforo	64
Figura 33. Se coloca la muestra de suelo en un vaso de precipitados y se tapa.....	64
Figura 34. Se desliza suavemente por las paredes.....	65

Figura 35. Humos cafés	65
Figura 36. Se coloca sobre una plancha hasta obtener 5 mL	65
Figura 37. Se adiciona 2 mL de agua destilada y 3 mL de peróxido	65
Figura 38. Reacción efervescente por el peróxido	66
Figura 39. Se deja enfriar hasta que termine la reacción	66
Figura 40. Se filtran los 5 mL hasta su aforo	66
Figura 41. Ejemplo de diagrama de componentes principales	68
Figura 42. Ejemplo de un dendograma (análisis cluster o de conglomerados)	69
Figura 43. Temperatura de las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.	72
Figura 44. Conductividad eléctrica de las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.	73
Figura 45. pH de las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.	74
Figura 46. Oxígeno disuelto en las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.	75
Figura 47. Dureza total de las muestras de agua subterránea y residual de Capula, Mich.	76
Figura 48. Demanda Bioquímica de Oxígeno de las muestras de agua subterránea de la comunidad de Capula, Mich.	77
Figura 49. Demanda Bioquímica de Oxígeno de las muestras de agua residual de la comunidad de Capula, Mich.	78
Figura 50. Cloruros de las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.	79
Figura 51. Sulfatos de las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.	79
Figura 52. Nitratos de las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.	80
Figura 53. Localización de los pozos de extracción de agua subterránea y las descargas de aguas residuales clasificadas con respecto al ICA.	85

Figura 54. Concentración de arsénico en las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.	88
Figura 55. Concentración de cobre en las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.	89
Figura 56. Concentración de zinc en las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.	89
Figura 57. Concentración de hierro en las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.	90
Figura 58. Diagrama de componentes principales de las variables fisicoquímicas usadas para determinar el ICA y la concentración de metales traza.	91
Figura 59. Diagrama Eh-pH de especies acuosas de arsénico en el sistema As–O ₂ –H ₂ O a 25°C y 1 bar de presión total	92
Figura 60. Diagrama de componentes principales de los casos estudiados	93
Figura 61. Porcentaje de humedad de las muestras de suelo de Capula, Mich.	95
Figura 62. pH de las muestras de suelo de Capula, Mich.	96
Figura 63. Representación de las muestra de suelo de acuerdo a su pH	97
Figura 64. Conductividad eléctrica de las muestras de suelo de Capula, Mich.	98
Figura 65. Distribución espacial de las muestras de suelo de acuerdo a su clase textural.	101
Figura 66. Diagrama de componentes principales de las variables estudiadas en las muestras de suelo	104
Figura 67. Diagrama de componentes principales de las variables estudiadas en las muestras de suelo sin considerar pH y C.E	105
Figura 68. Diagrama de cajas para la concentración de As en las muestras de suelo	106
Figura 69. Diagrama de cajas para la concentración de Cu en las muestras de suelo	107

Figura 70. Diagrama de cajas para la concentración de Zn en las muestras de suelo	108
Figura 71. Diagrama de cajas de arenas, limos y arcillas en las muestras de suelo	109
Figura 72a. Gráfica de dispersión As vs L+A	110
Figura 72b. Gráfica de dispersión Cu vs L+A.....	111
Figura 72c. Gráfica de dispersión Zn vs L+A	111
Figura 73. Diagrama de árbol de las muestras de suelo	112
Figura 74. Mapa de distribución del arsénico en los suelos de la comunidad de Capula. Se presentan los puntos de muestreo con respecto a su clase textural	114
Figura 75. Mapa de distribución del cobre en los suelos de la comunidad de Capula. Se presentan los puntos de muestreo con respecto a su clase textural	115
Figura 76. Mapa de distribución del zinc en los suelos de la comunidad de Capula. Se presentan los puntos de muestreo con respecto a su clase textural	116
Figura 77. Diagrama de cajas de la conductividad eléctrica medida en las muestras de suelo	117
Figura 78. Diagrama de cajas del pH medido en las muestras de suelo.....	118
Figura 79. Diagrama de especies del arsénico	119
Figura 80. Mapa de distribución del arsénico en los suelos de la comunidad de Capula. Se indican los puntos que presentan las características del As disponible	120

RESUMEN

Capula es un poblado ubicado a 17 km de la ciudad de Morelia y cuya principal actividad económica es la alfarería. El agua y el suelo de la zona son afectados por los procesos artesanales debido a la mala disposición de los residuos derivados de las técnicas que se emplean, provocando concentraciones de elementos traza mayores a las establecidas en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), una vez que se supera la capacidad finita de retención en suelo.

De acuerdo a lo anterior, se realizó el análisis de metales traza y parámetros físicos y químicos de seis muestras de agua subterránea, dos de aguas residuales y treinta muestras de suelo distribuidas en toda la comunidad. Todos los parámetros se analizaron conforme a las normas mexicanas (NOM) y a la US EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América), se compararon también los límites permisibles de las NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-127 SSA1-1994, NOM-001-ECOL-1996, NOM-159-SEMARNAT-2011 y la OMS (Organización Mundial de la Salud) y se analizaron sus posibles correlaciones por medio de métodos estadísticos multiparamétricos (análisis de componentes principales, análisis de factores y análisis de conglomerados o clústers) para encontrar evidencia de disponibilidad en el ambiente de metales traza.

A partir de los parámetros físicos y químicos del agua se determinó el Índice de Calidad del Agua (ICA) obteniendo valores que van de 51.8 a 65.7 para las aguas subterráneas y de 16.5 para las aguas residuales; lo que indica que las aguas subterráneas están poco contaminadas, pero requieren tratamiento, y las aguas residuales están altamente contaminadas, por lo que no se recomiendan para ningún tipo de uso. Con respecto a los metales traza en agua, únicamente el As estuvo presente en los pozos Iratzio (0.002 mg/L), Buenavista (0.0028 mg/L) y Secundaria (0.0017 mg/L), concentraciones que no rebasaron las NOM (0.01 mg/L NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004 y 0.05 mg/L para agua potable NOM-127-SSA1-1994).

En relación a las muestras de suelo, se obtuvieron valores de pH de 6 a 7, conductividad eléctrica de 431 a 2703 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y texturas arenosas, incapaces de adsorber al As. Las concentraciones de As variaron desde 0.2 a 2 mg/kg, el Cu de 3.7 a 123 mg/kg y el Zn de 24.9 a 319 mg/kg. Las concentraciones más altas se localizan en sitios donde se practica la actividad alfarera, sin embargo, tampoco rebasan las NOM. Por otro lado, el As es el único elemento que mostró características para estar disponible en el ambiente.

Palabras clave: *Alfarería, Arsénico, Calidad, Cobre, Zinc*

ABSTRACT

Capula is a town located 17 km from the city of Morelia and whose main economic activity is pottery. The water and the soil of the area are affected by the artisanal processes due to the poor disposition of the residues derived from the techniques that are used, causing concentrations of trace elements greater than those established in the Official Mexican Standards (NOM), once that the finite capacity of retention in soil is exceeded.

According to the above, the trace metal analysis and physical and chemical parameters were performed on six groundwater samples, two on wastewater and thirty soil samples distributed throughout the community. All the parameters were analyzed according to the Mexican norms (NOM) and to the US EPA (United States Environmental Protection Agency), the permissible limits of NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-127 SSA1-1994, NOM-001-ECOL-1996, NOM-159-SEMARNAT-2011 and the WHO (World Health Organization) were also compared. They were analyzed their possible correlations by means of multiparameter statistical methods (principal component analysis, factor analysis and clusters or cluster analysis) to find evidence of availability in the trace metal environment.

Based on the physical and chemical parameters of the water, the Water Quality Index (ICA) was determined, obtaining values ranging from 51.8 to 65.7 for groundwater and 16.5 for wastewater; This indicates that groundwater is poorly polluted, but requires treatment, and wastewater is highly contaminated, so it is not recommended for any type of use. With respect to trace metals in water, only the As was present in the wells Iratzio (0.002 mg / L), Buenavista (0.0028 mg / L) and Secundaria (0.0017 mg / L), concentrations that did not exceed the NOM (0.01 mg) / L NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004 and 0.05 mg / L for drinking water NOM-127-SSA1-1994).

In relation to soil samples, pH values were obtained from 6 to 7, electrical conductivity from 431 to 2703 $\mu\text{S} / \text{cm}$ and sandy textures, unable to adsorb to As. As concentrations ranged from 0.2 to 2 mg / kg, Cu from 3.7 to 123 mg / kg and Zn from 24.9 to 319 mg / kg. The highest concentrations are located in places where the pottery activity is practiced, however, they do not exceed the NOM. On the other hand, the As is the only element that showed characteristics to be available in the environment.

Keywords: Pottery, Arsenic, Quality, Copper, Zinc

1. INTRODUCCIÓN

1. **Introducción**

Capula es un poblado localizado a 17 km de la cd. de Morelia, su nombre proviene del náhuatl “*Capulín*” y “*An*” que significa “Lugar de capulines”, y fue fundada en el año de 1550. Es uno de los pueblos del estado de Michoacán que aún conserva y practica viejas tradiciones. Pese a su cercanía con la capital del estado, ha tenido muy bajo desarrollo urbano y económico en las últimas décadas, siendo la fabricación de su alfarería y artesanías una de las actividades principales de la población y de las cuales proviene gran parte de la economía de sus habitantes.

La alfarería es uno de los oficios más antiguos de la humanidad, durante cientos de años, los alfareros han transformado la arcilla en objetos utilitarios o de exposición. Existe la presencia de metales pesados en productos útiles en múltiples procesos industriales que aunque ya han sido descontinuados en una gran cantidad de productos como pinturas, gasolinas, tuberías, juguetes y latas, se siguen utilizando en la alfarería. La comunidad alfarera está expuesta no solo al momento de esmaltar, sino constantemente debido a la contaminación ambiental, cuando el esmalte a base de plomo se esparce en sus talleres y casas (Noyola, 2017).

Como consecuencia de los procesos artesanales, el medioambiente es afectado por determinadas emisiones al aire, agua y suelo. El agua es un componente indispensable utilizado tanto en la generación de pastas y esmaltes, así como parte del proceso de producción. Las aguas utilizadas en la industria alfarera se caracterizan por la presencia de sólidos en suspensión (sulfatos, cloruros, fluoruros), metales pesados en solución y compuestos de boro y trazas de materia orgánica.

El suelo, al igual que el agua, se ve afectado por los procesos de producción, debido a que muchos residuos derivados de estas técnicas son tirados y derramados sobre el mismo, provocando su contaminación. Todos estos efectos negativos son generados no sólo por la derrama de líquidos, sino también por el depósito de metales ya procesados y productos alternos que forman parte de los procesos de producción artesanal (Cruz-Murueta, 2009).

La presencia de concentraciones nocivas de algunos elementos químicos en un sistema se denomina contaminación. El contaminante está siempre en concentraciones mayores de las habituales (anomalías) y en general tiene un efecto adverso sobre algunos organismos. Por su origen, puede ser geogénico o antropogénico, los primeros pueden proceder de la roca madre de la que se formó el suelo, de la actividad volcánica o del lixiviado de mineralizaciones, por el contrario, los antropogénicos se producen por los residuos derivados de actividades industriales, agrícolas, mineras, residuos sólidos y en este caso, la actividad artesanal.

Los “metales pesados” son aquellos con peso atómico mayor que el del hierro (55.85 g/mol). Según esta definición, se excluirían metales con pesos atómicos menores que el del Fe y que con frecuencia pueden ser metales contaminantes, como el V (50.95), Mn (54.44), Cr (52.01) y a otros que realmente no son metales como As, F y P. Por ello, se utiliza el término de “elementos traza”. Los elementos traza están presentes en relativamente bajas concentraciones (mg/kg) en la corteza de la Tierra, suelos y plantas.

En general todos los elementos traza son tóxicos si se ingieren o inhalan en cantidades suficientemente altas y durante largos períodos de tiempo.

El suelo es el mayor y más importante sistema depurador de elementos traza del medio terrestre. Sin embargo, tiene una capacidad finita de retención, por lo que aproximarse o excederse a esta capacidad podría dar lugar a consecuencias medio ambientales negativas, llegando a la infiltración de contaminantes en las aguas subterráneas una vez que se ha sobrepasado la capacidad de retención del suelo. Los contaminantes pueden abandonar un suelo por volatilización, disolución, lixiviación o erosión y pasar a los organismos cuando pueden ser asimilables (bioasimilables). En concreto, la posibilidad de que un elemento (contaminante o no) quede libre y pase a disolución en un suelo se llama disponibilidad. (Newman & Jagoe, 1994).

Debido a que los cambios que se producen en el suelo son lentos y difíciles de cuantificar, durante mucho tiempo se ha ignorado el desarrollo de estándares de calidad de suelos, comparado con el desarrollo de estándares de calidad de agua o

aire. Para poder cuantificar la calidad de un suelo se debe disponer de Índices de Calidad de Suelos o Valores de Referencia, de acuerdo al uso del mismo (Canadian Environmental Quality Guidelines, 2003).

La EPA (US Environmental Protection Agency) considera trece elementos traza como muy tóxicos y a la vez, fácilmente disponibles en concentraciones que sobrepasan los niveles de toxicidad, que son: Sb, As, Be, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Tl y Zn.

El agua puede contaminarse por diversas fuentes, la superficial es la más susceptible a causa de su mayor exposición, en cambio el agua subterránea puede arrastrar sustancias nocivas para la salud que se encuentran en el suelo que atraviesa hasta llegar a ella. La contaminación del agua subterránea es, en muchos casos, un proceso difícilmente reversible debido a la dificultad de regeneración del acuífero aun cuando ésta sea económicamente viable.

Actualmente, alrededor del 70% del suministro de agua potable de Morelia es subterráneo, en su mayoría, proveniente del sistema acuífero que se localiza al poniente de la ciudad, conformado por unidades hidrogeológicas correspondiente al vulcanismo del corredor Tarasco (Garduño-Monroy *et al.*, 2010) y donde se localiza la comunidad de Capula, una de las zonas más importantes de la industria alfarera que se está viendo afectada por la presencia de elementos traza debido a la actividad artesanal y que, aunado a lo anterior, es considerada una de las comunidades más importantes para la recarga de los mantos freáticos.

Por tal motivo, el objetivo principal del trabajo se ha enfocado en la determinación de las concentraciones de elementos traza en los suelos afectados por la actividad alfarera, así como el análisis de la calidad del agua que suministra a la comunidad y la de las aguas residuales para encontrar la relación entre las concentraciones de los elementos traza tanto en agua como en suelos.

1.1. **Justificación**

Actualmente, 70% del agua que abastece a la ciudad de Morelia es de origen subterráneo y la mayor parte proviene de la zona ubicada al poniente de la capital, donde se ubica la comunidad de Capula, la cual fue identificada por Ayala (1996) como una de las zonas más importantes de recarga del acuífero, junto a los poblados de Cuto de la Esperanza, Irapeo y Mil Cumbres.

Es poco lo que se conoce sobre las implicaciones y consecuencias que tiene la actividad artesanal de la comunidad de Capula sobre el suelo y el agua subterránea. Los elementos traza pueden estar presentes en el agua una vez que se ha sobrepasado el límite de retención del suelo, dado que las aguas derivadas del proceso de producción artesanal se vierten directamente en el suelo o en las corrientes de agua que atraviesan la comunidad.

Se han registrado sitios con presencia de elementos nocivos para la salud, como Capula, Coíntzio, Tacícuaro, San Bernabé, entre otros, donde la presencia de algunos metales sobrepasan los límites permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana para consumo humano según la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 1994, Organista-Mota, 2017).

De acuerdo a lo anterior, se consideró importante realizar un estudio sobre la concentración y disposición de elementos traza en suelos y agua de la comunidad de Capula, Michoacán, para conocer las relaciones que existen entre ellos y determinar si efectivamente la actividad alfarera ha inducido a la contaminación de los recursos hídricos y del suelo provocada por la mala disposición de los residuos utilizados en la actividad artesanal.

1.2. **Hipótesis**

El suelo y las aguas que abastecen a la comunidad de Capula, Michoacán están en contacto constante con residuos y desechos de la alfarería, la principal actividad

artesanal del lugar. Esta influencia de la alfarería en el medio podría estar aportando una cantidad significativa de metales traza, tanto al agua como a los suelos.

Dado que la alfarería no es una actividad económica destructiva y de alto impacto en el ambiente, se limita a una producción meramente artesanal, se espera encontrar concentraciones muy bajas de metales traza que no rebasen los límites expuestos en las normas oficiales mexicanas.

Dependiendo de las características fisicoquímicas y edáficas del suelo se espera encontrar algún metal traza disponible en el ambiente.

1.3. **Objetivos**

1.3.1. **Objetivo general**

Determinar la concentración de metales traza (As, Cu y Zn) en suelos y agua de pozos de extracción que abastecen a la comunidad de Capula, Michoacán.

1.3.2. **Objetivos particulares**

- 1.- Medir los parámetros físicos y químicos de los suelos y del agua subterránea en los pozos de abastecimiento de la comunidad de Capula, Michoacán.
- 2.- Correlacionar los parámetros físicos y químicos con las concentraciones de elementos traza de los suelos y agua de los pozos de la comunidad de Capula, Michoacán.
- 3.- Determinar la disponibilidad de metales traza en las muestras de suelo de la comunidad de Capula, Michoacán.

1.4. Antecedentes

La contaminación por metales pesados en México es un problema que va en aumento debido a la actividad antrópica. El desarrollo de determinadas actividades industriales puede constituir un riesgo de contaminación ambiental. Tal riesgo involucra, además de las emisiones atmosféricas, la mala gestión de los residuos y un deficiente almacenamiento de las materias primas y productos, pudiendo provocar la acumulación y por ende, la contaminación por elementos traza en el suelo y agua (Covarrubias y Peña-Cabriales, 2017).

1.4.1. Contaminación por metales pesados en México

Los metales contaminantes más importantes en México, dada su toxicidad y abundancia son: Hg, As, Pb y Cr. Entre los sitios más afectados por las altas concentraciones de metales pesados en suelos se encuentran los estados de Zacatecas, Querétaro, Hidalgo, San Luis Potosí y la Ciudad de México (Cobarrubias *et al.*, 2017), por tal motivo, se han realizado diversos estudios para la determinación de metales pesados por la actividad establecida en la zona.

En 2006, la Dirección de Medio Ambiente y Ecología, realizó un análisis sobre la calidad del agua en pozos del área de las comunidades rurales del municipio de San Miguel de Allende, Gto. examinados durante 2005 y 2006 para detectar la contaminación por As, fluoruros y bacteria coliforme, encontrando que de las 101 muestras, 20 de ellas excedieron las Normas Oficiales Mexicanas NOM-127SSA1-1994 (DOF, 1994), NOM-023-SEMARNAT-2001 (DOF, 2001i), NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1996a) otras 69 dieron positivo a la bacteria coliforme y el As estuvo debajo de los estándares establecidos y no plantean un riesgo para la salud.

García-Vargas *et al.* (2007) realizaron un estudio sobre la contaminación por metales pesados y metaloides en suelos de casa-habitación del área urbana en la

ciudad de Torreón, Coahuila, seleccionando tres vecindarios cercanos a la zona metalúrgica de la empresa Peñoles S.A. de C.V., considerada una de las más grandes a nivel mundial y determinando que las concentraciones de As, Cd y Pb mostraban altas concentraciones cercanas al complejo metalúrgico, las cuales superan hasta tres veces las consideradas aceptables, por lo que recomiendan que se debe mantener una vigilancia estrecha para reducir los riesgos a la salud de las poblaciones potencialmente expuestas debido a su vecindad con el complejo fundidor.

García-Martínez (2007), realizó la determinación de metales pesados (Al, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb y V) en la precipitación pluvial de una zona urbana de la Ciudad de México y una zona rural del Estado de México, concluyendo que las concentraciones de metales pesados variaban significativamente de un sitio a otro, siendo mucho mayores en suelos de la Ciudad de México, debido a la contribución de las fuentes antropogénicas en la zona urbana.

González *et al.* (2010) determinaron metales pesados en suelos superficiales de 14 municipios del estado de Chihuahua, con el objetivo de conocer el estado de las propiedades físicas y químicas de suelos en zonas urbanas e industriales. Mencionan que la movilización de los metales podría provocar la infiltración o acumulación de ellos, ocasionando pérdida de fertilidad o contaminación de los mantos freáticos. Los resultados muestran altas concentraciones de Cd, Ba, As y Hg y particularmente del Pb (107.4 mg/kg), atribuyéndoselo a la actividad metalúrgica del estado.

Noyola (2017) realizó un análisis para explicar la problemática de intoxicación por elementos traza en la comunidad de San Miguel Tenextatiloyan, municipio de Zautla, Puebla, la cual tiene como actividad económica principal la alfarería, con el objetivo de relacionar el uso del Pb de la actividad alfarera, con el padecimiento de enfermedades crónicas de gran parte de los habitantes. Los resultados confirman que los niveles de plomo en sangre de la población alfarera rebasan los señalados como permisibles en la norma oficial mexicana NOM-199-SSA1-2000 (DOF, 2000c).

1.4.2. Contaminación de las aguas subterráneas por la actividad antropogénica en Morelia

Buenrostro *et al.* (2001), mencionan que en la región de Morelia-Capula, el aspecto negativo del consumismo y consecuente generación de residuos sólidos, radica en que la gestión de los residuos sólidos urbanos (RSU) carece de planes y programas tendientes a disminuir la producción de los mismos, el impacto sobre el ambiente y la salud pública, así como la conservación de recursos, ello repercute en la disminución de la calidad de vida de los habitantes de la zona debido a la afectación del agua subterránea, suelo y aire.

Verduzco-Cedeño (2010), determinó la evaluación de la contaminación en el acuífero, en la región de Morelia-Capula producto del impacto del basurero municipal de la ciudad de Morelia, determinando concentraciones de Mn, Fe, Cu, Zn, As y Cd mayores a los límites que establece la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 1994), mientras que las concentraciones de plomo fueron menores. Lo anterior como consecuencia de la infiltración de lixiviados generados por el basurero municipal de la Ciudad de Morelia.

Israde-Alcántara *et al.* (2012) elaboraron una caracterización geológica con la finalidad de determinar las implicaciones ambientales que genera el tiradero de la ciudad de Morelia, realizaron análisis geoquímicos en aguas subterráneas del acuífero de Morelia y en lixiviados, determinando altas concentraciones de metales pesados (Cd, Pb, As) superiores a las establecidas en la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 1994). Concluyeron que el sitio carece de un substrato impermeable ideal para retener los contaminantes.

Organista-Mota (2017) desarrolló un estudio sobre la calidad del agua subterránea y su relación con la salud pública en la región de Capula-Cointzio, identificando la presencia de Mn en pozos de Villa Magna (0.046 mg/L), Cerrito Itzícuaró (0.181 mg/L) y Tacícuaró (0.220 mg/L); Pb en los pozos de Capula (0.110 mg/L), La Hacienda (0.100 mg/L) y Arko San Juan (0.015 mg/L).

1.4.3. Metales pesados en suelos, sedimentos y agua de la cuenca del Lago de Cuitzeo

La problemática de contaminación por metales pesados en la cuenca del Lago de Cuitzeo ha tenido un aumento significativo en los últimos años, por lo cual se han realizado varios estudios para identificar y determinar sus concentraciones. La mayoría de los estudios se enfoca en la contaminación del agua, mientras que la capacidad del suelo de adsorber metales pesados es poco estudiada en la actualidad.

Alfaro (2010) realizó un estudio sobre la movilidad y toxicidad de metales pesados en agua y sedimentos del Lago de Cuitzeo, tomando ocho puntos dentro del lago, dos en la desembocadura del Río Grade con el lago y dos más en la parte final del río, determinando que las concentraciones en mg/L, tanto en agua como en sedimentos de Cr (11.3 y 124), Cu (26.2 y 122), Ni (13.270 y 51), Pb (27.52 y 57), Zn (246.04 y 366) y As (29.6 y 22.6), siendo más altas y de mayor toxicidad en sedimentos que en agua. Las concentraciones más altas se presentaron en los sitios cercanos a la desembocadura del Río Grande y permiten suponer un aporte de contaminantes metálicos al lago que provienen de las descargas industriales de la ciudad de Morelia y que son arrastradas por el río.

Villalobos *et al.* (2010) realizaron un reporte sobre la biodisponibilidad y concentración de As, Fe y Zn en muestras de agua y sedimentos del Lago de Cuitzeo. Los autores le adjudican la presencia de metales pesados principalmente a la contaminación antropogénica, sin embargo señalan que la presencia de As en la zona es de origen natural. También mencionan que la contaminación por metales pesados en el lago aumentará en el futuro si no son tomadas las medidas necesarias para evaluarla.

Díaz-Rodríguez (2013) realizó una evaluación de la calidad del agua y sedimentos en el Río Grande de Morelia, determinando metales pesados (Fe, Zn, Ni, Cu, Pb, Cd, Cr, Ag y As) en sedimentos. El Zn y el Fe presentan las concentraciones más

altas con dos especies dominantes: Zn^{+2} y ZnCO_3 para zinc y para el Fe (II) Fe^{2+} y Fe (III) fue el $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Concluye que los sitios que presentan mayor contaminación se localizan dentro de la zona de Morelia, dado que es donde se localizan la mayor variación de los parámetros físicos y químicos. En cuanto a las concentraciones de los metales pesados en agua y sedimentos, se encontraron dentro de los límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1996a), la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 1994) y la OMS (2011).

Panduro *et al.* (2014) realizaron un estudio de calidad del agua en la zona oriente de Michoacán, determinando sus parámetros físicos y químicos según las normas de referencia NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 1994), NOM-041-SEMARNAT-2006 (DOF, 2006) y OMS, 2011. Los resultados de la calidad del agua respecto a sus parámetros físicos y químicos se encuentran dentro de los límites permitidos. Los resultados del análisis multivariado demuestran que la calidad del agua está influenciada por condiciones geológicas e hidrológicas de la región así como por cambios estacionales, por lo que se recomiendan medidas preventivas, sin determinar con claridad la asociación a la consecuencia de casos por fallo renal.

Delgado *et al.* (2015) determinaron la concentración de elementos potencialmente tóxicos (B, Cd, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Ni, Pb, V y Zn) en suelos de la ciudad de Morelia, bajo la influencia del uso del suelo y tipo de vialidad. Concluyeron que la concentración de metales pesados no está influenciada por el tipo de vialidad ni uso del mismo. Determinando altas concentraciones de V, Mn, Pb y Fe y rebasando los límites permitidos por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (DOF, 2004) y la US-EPA. Mencionan que las menores concentraciones de Pb, Mn y Zn se encuentran en el uso de suelo de áreas verde, por lo que recomiendan reforzar las mismas, ya que las áreas verdes amortiguan la contaminación por metales pesados.

Casillas-Corona (2016) realizó un estudio en el municipio de Copándaro, Mich. para estudiar la relación que existe entre los metales pesados y las enfermedades de los habitantes. Evaluó parámetros físicos y químicos y determinó la concentración de

metales pesados en agua potable, aguas residuales, suelos y sedimentos a un lado de los pozos de aprovechamiento y descargas. Concluyó que existe la presencia de As, Cd, Cr, Ni y Zn en concentraciones aún menores a las establecidas (NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 1994), NOM-023-SEMARNAT-2001 (DOF, 2001i), y la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1996a), pero señala que al estar presentes, son bioacumulables.

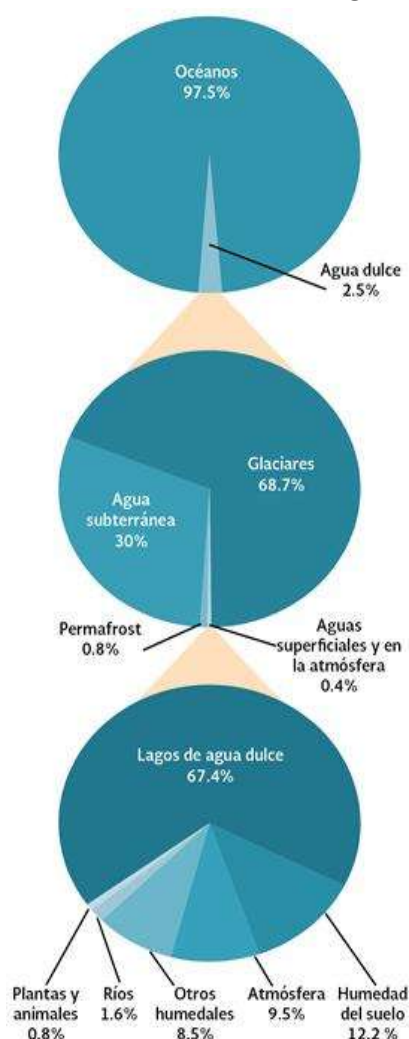
2. MARCO TEÓRICO

2. Marco teórico

2.1. El agua

El agua es uno de los recursos más importantes para la vida del planeta. Los humanos dependemos de su disponibilidad no sólo para el consumo doméstico, sino también para el funcionamiento y la continuidad de las actividades agrícolas e industriales. El agua en estado puro tiene tres propiedades básicas: es incolora, inodora e insípida y posee un tono azulado que únicamente puede apreciarse en capas de gran profundidad. Es también el compuesto principal de la materia viva, pues dentro de los organismos vivos, su porción constituye entre el 50 y el 90%.

2.1.1. Distribución del agua en el mundo



Se estima que existen 1,400 millones de km³ de agua en el planeta, de los cuales solo el 2.5% corresponde a agua dulce y la mayor parte de la misma se encuentra en forma de hielo o depósitos subterráneos de difícil acceso, por lo que únicamente el 0.01% de agua está disponible para las actividades humanas.

Aunado a ello, la contaminación de la misma dificulta su aprovechamiento (PNUMA, 2002).

Figura 1. Distribución del agua en el mundo (PNUMA, 2002).

La cantidad de agua que tenemos en el planeta no varía, sin embargo, el lugar, la forma y la calidad en que se encuentra sí presentan variaciones. A nivel local no disponemos de una cantidad fija. Hay promedios históricos, pero desgraciadamente cada vez es menos el agua disponible tanto en cantidad como en calidad, debido a la sobreexplotación, el cambio climático, la contaminación y la deforestación que hemos provocado (PNUMA, 2002).

2.1.2. El agua en México

En México, el volumen promedio de agua que se obtiene por precipitación cada año es de 1,489 km³, no obstante, la mayor parte, alrededor de 1,089 km³ (73.1%), regresa a la atmósfera por evapotranspiración, por lo que se conoce como “agua verde” (Falkenmark y Rockström, 2004).

El volumen de agua almacenado en los lagos del país (alrededor de 10 km³) es relativamente pequeño si se contrasta con lo que se utiliza sólo para el abastecimiento público nacional anual, que equivale a cerca de 11 km³ (CONAGUA, 2011). Esto se debe, básicamente, a que la orografía mexicana no permite la formación de lagos profundos. Por esa razón, para asegurar el suministro del líquido para los diferentes usos en todo el país, y considerando la heterogeneidad espacial y temporal en la precipitación, se ha construido una importante red de infraestructura hidráulica en forma de presas y embalses (CONAGUA, 2011).

En México, la disponibilidad per cápita de agua se ha reducido a partir de 1950, pasando de 17, 742 m³/año a 4,090 m³ en el 2010 (una disponibilidad menor a 1,700 m³/año se considera como situación de estrés hídrico) (CONAGUA, 2011).

Los valores nacionales per cápita pueden enmascarar situaciones de estrés hídrico a nivel regional. México presenta todo el espectro de categorías de disponibilidad de agua en sus regiones hidrológico-administrativas, que van desde la muy alta, alta, media, baja, muy baja, hasta la extremadamente baja (menor a 1,000 m³/hab/año (CONAGUA, 2011).

Si se considera a las regiones hidrológico-administrativas con disponibilidades muy baja, resulta que más de 75 millones de habitantes en el país (alrededor del 66% de la población nacional) se encontraban en situación de estrés hídrico en 2010.

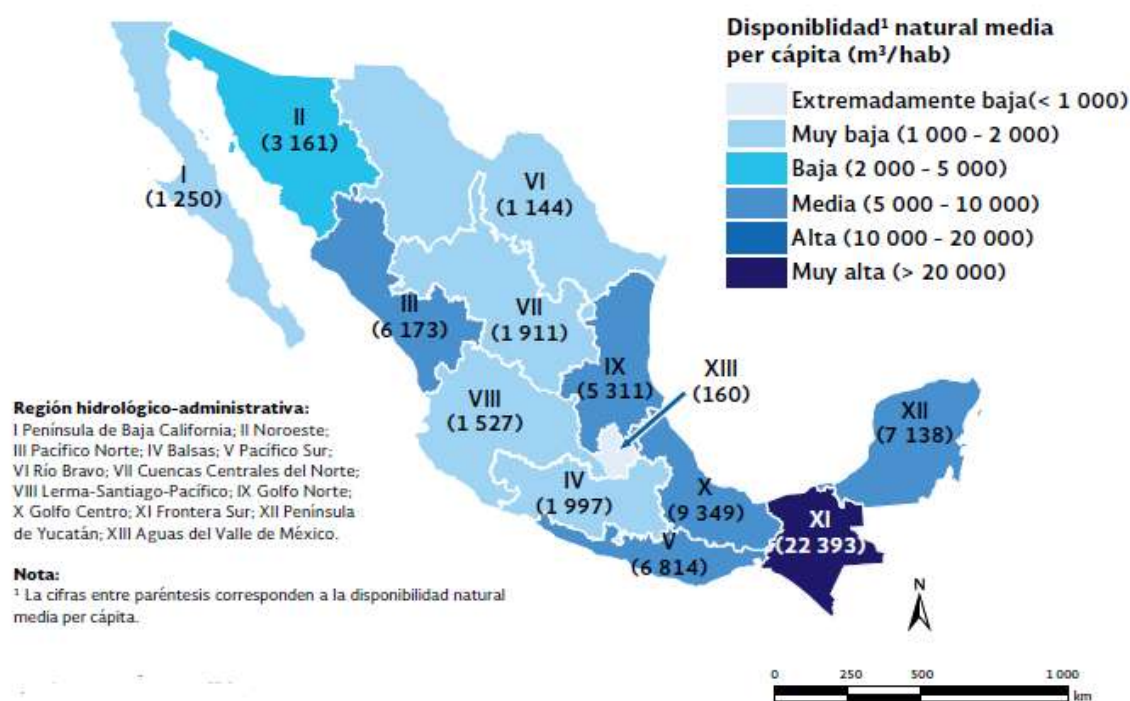


Figura 2. Disponibilidad natural media per cápita por región hidrológico-administrativa en 2010 (CONAGUA, 2011).

La mayor parte del agua subterránea que se extrae en México se destina a las actividades agropecuarias. En el 2010, ~77% se utilizó para el riego de 6.5 millones de hectáreas, además de las actividades pecuarias y acuícolas. El 14% se destinó al uso para abastecimiento público y el 9% para la generación de energía eléctrica. Dentro de los usos no consuntivos del agua, en 2009 las hidroeléctricas emplearon para su funcionamiento un volumen de 136.1 km³ para generar 26.4 TWh⁹ de electricidad (11.3% del total nacional).

Del volumen total de agua que se concesionó en el país en 2010, casi 56% (44.6 km³) correspondió a las regiones Lerma-Santiago- Pacífico (14.6 km³, 18%), Balsas

(10.4 km³, 12.9%), Pacífico Norte (10.4 km³, 13%) y Río Bravo (9.3 km³, 11.6%); las regiones que menos agua extrajeron fueron Pacífico Sur (1.4 km³), Frontera Sur (2.2 km³) y Península de Yucatán (2.8 km³), que en conjunto representan apenas el 8% del total nacional.

2.1.3. El agua en Michoacán

La precipitación promedio en el estado es alrededor de 800 mm/año. Tiene notables variaciones estacionales, que marcan muchos aspectos de la vida en sus regiones, tanto por su impacto en los ciclos agrícolas como en otras dimensiones de la vida productiva y social. Aunque no padece de sequías severas, algunas de sus regiones en la última década han visto reducida la precipitación pluvial (CNA, 2004).

El uso del agua se centra principalmente en la actividad agrícola, con un 87.95% del total, un 5.4% se destina al público urbano y un 3.7% al uso industrial, el resto se reparte entre los usos pecuario y múltiple. Del volumen concesionado total, el 77.64% corresponde a fuentes superficiales y el 22.36% es de origen subterráneo, sin embargo, el abasto de agua en las cuencas Río Tepalcatepec, Ciénega de Chapala y Lago de Cuitzeo son, en su mayoría, de aguas subterráneas. Por otro lado, las cuencas Río Tepalcatepec, Río Cupatitzio y Río Cutzamala son abastecidas principalmente por aguas superficiales, en orden de mayor a menor volumen (CONAGUA, 2011).

2.2. Calidad del agua

Calidad del agua se refiere a las características químicas, físicas, biológicas y radiológicas del agua. Es una medida de la condición del agua en relación con los requisitos de una o más especies bióticas o a cualquier necesidad humana o propósito.

Se utiliza con mayor frecuencia por referencia a un conjunto de normas contra las cuales puede evaluarse el cumplimiento. Los estándares más comunes utilizados para evaluar la calidad del agua se relacionan con la salud de los ecosistemas, seguridad de contacto humano y agua potable (Waterlogic, 2016).

2.2.1. Calidad del agua en Morelia

El rápido crecimiento industrial y urbano no planificado en el valle de Morelia ha dado como resultado que sustancias tóxicas orgánicas e inorgánicas sean continuamente acarreadas hacia los cuerpos de agua superficial y subterránea, sin contar con las descargas urbanas sin tratar, que comúnmente llevan en suspensión abundantes coliformes fecales (aguas negras); todo esto hace a los acuíferos vulnerables a la contaminación.

Las principales fuentes de contaminación son los grandes volúmenes de aguas residuales municipales, aguas residuales industriales, aguas de retorno agrícola, actividades pecuarias y lixiviados que se producen en los tiraderos municipales, al no contar la mayoría con manejo, tratamiento y disposición final adecuados.

La acumulación de metales traza en aguas superficiales y subterráneas del valle de Morelia puede causar serios problemas ambientales en los ecosistemas acuáticos. Los cuerpos de agua superficiales están sometidos a marcados periodos de lluvias y estiaje, este último favorece la concentración de metales en los sedimentos y en los organismos que los habitan. Los acuíferos también han sido deteriorados grandemente a través del ingreso de residuos químicos para uso agrícola, cuyos componentes que no son absorbidos por las plantas escurren y permanecen en los suelos y son posteriormente acarreados por drenajes o adsorbidos en capas más profundas del suelo, llegando a alcanzar los acuíferos.

En la localidad de Capula se extrae el agua subterránea a través de pozos, los cuales son vulnerables a la contaminación por metales traza debido a las actividades artesanales que se llevan a cabo en la localidad (principalmente

alfarería). A pesar de que los metales pueden ser introducidos desde fuentes naturales, en zonas donde éstos están enriquecidos por actividades industriales, por ejemplo en zonas mineras, zonas geotérmicas e incluso por manejo de insumos de actividades artesanales, como es el caso de la localidad de Capula, se puede generar contaminación del agua. En zonas geotérmicas, como Los Azufres, Mich., las lagunas de evaporación generan salmueras hipersalinas las cuales afectan los suelos del entorno a partir de fugas de las tuberías de conducción o de derrames en los pozos de reinyección que incrementan las concentraciones de elementos, tales como Fe, Mn, F, B y As que migran de su fuente natural. La contaminación fecal en zonas agrícolas causada por la irrigación de agua proveniente de drenajes urbanos es ampliamente conocida, dando como resultado la implantación de huevos, entre ellos de *Taenia sp.*; a pesar de ello, algunos cultivos irrigados con aguas conteniendo coliformes no contienen altos grados de contaminación en la localidad de Capula (Felix *et al.*, 1996).

2.2.2. Parámetros físicos y químicos del agua

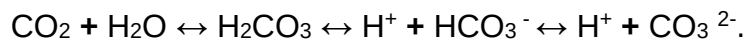
Los parámetros físicos y químicos son utilizados para conocer la calidad del agua y se determinan tanto *in situ* como en laboratorio con metodologías específicas. Los que se determinaron para las muestras de agua son los siguientes:

2.2.2.1. Temperatura

La temperatura del agua afecta a la solubilidad de sales y gases y en general a todas sus propiedades químicas y a su comportamiento microbiológico. Para medir la temperatura del agua se debe utilizar un termómetro convencional o electrónico en el fluido hasta alcanzar el equilibrio térmico. Debe efectuarse en el momento de la toma de muestra.

2.2.2.2. pH

El pH del agua depende del equilibrio carbónico:



En aguas superficiales el pH es de 6.0-8.5 y en aguas profundas y subterráneas es menor a 7.5. La medición del pH se realiza mediante el método potenciométrico con electrodo de vidrio sensible a H^+ , se lleva a cabo tanto *in situ* como en laboratorio.

2.2.2.3. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica en el agua es producida por los electrolitos que lleva disueltos. Los iones mayoritarios que forman las sales disociadas en el agua suelen ser HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ .

Para medir la conductividad eléctrica se usa una celda de conductividad equipada con electrodos de Pt, una fuente externa de corriente y un puente de Wheatstone. Se suele calibrar con patrones de KCl.

2.2.2.4. Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto es esencial para la vida vegetal y animal en el agua. Un nivel alto de oxígeno disuelto indica agua de mejor calidad. Su solubilidad es función de: temperatura, presión, presión de vapor del gas, salinidad y composición fisicoquímica del agua. Los orígenes del oxígeno disuelto en el agua son por absorción del oxígeno del aire y/o fotosíntesis de las plantas acuáticas. Las aguas superficiales no contaminadas suelen estar bien oxigenadas e incluso sobresaturadas (>7-8 mg/L de O_2). Las aguas subterráneas suelen estar poco oxigenadas.

2.2.2.5. **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)**

Es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua. Este método se determina por la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto al cabo de cinco días de incubación a 293°K (20°C) NMX-AA-028-SCFI-2001 (DOF, 2001 g).

La DBO₅ es el resultado de tres tipos de materiales: materiales orgánicos utilizables como fuente de alimentación por organismos aerobios, nitrógeno oxidable derivado de la presencia de compuestos orgánicos nitrogenados que son nutrientes para bacterias específicas y compuestos químicos reductores como Fe²⁺, SO₃²⁻ y S²⁻ que se oxidan en presencia del oxígeno disuelto.

2.2.2.6. **Dureza total**

Es una característica producto de las sales de Ca y Mg, tal como bicarbonatos, carbonatos, sulfatos y nitratos; esta propiedad es causada por los iones metálicos divalentes, es decir, los cationes de Calcio (Ca⁺) y Magnesio (Mg⁺⁺). Las aguas duras pueden causar incrustaciones de partículas en las paredes del pozo y ponerlo fuera de funcionamiento. Existen problemas con los pozos perforados en rocas carbonatadas porque la reducción de presiones causa liberación de CO₂ que al reaccionar con el Mg y Ca, forman capas de carbonatos; esto hace que se produzcan pérdidas en la eficiencia o el abandono del pozo durante periodos inferiores a los 3 años de su uso.

2.2.2.7. **Constituyentes mayores**

En los sistemas acuáticos se disuelven numerosas sales y sustancias de acuerdo a sus solubilidades. Algunos de estos iones se encuentran en forma mayoritaria, respecto a los demás elementos en todas las aguas continentales: Na⁺, K⁺, Ca²⁺,

Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , mientras que otros se hallan a niveles trazas, tal es el caso de los metales pesados, siendo algunos de ellos necesarios para el correcto desarrollo de los microorganismos, animales y plantas.

2.2.2.7.1. Cloruros

El cloro (Cl) es un elemento electronegativo, es uno de los aniones inorgánicos presentes en las aguas naturales, siendo uno de los iones que se encuentran en mayores concentraciones en el agua de mar. Está ampliamente distribuido en la naturaleza, principalmente formando NaCl. (Sierra *et al.*, 2007).

2.2.2.7.2. Sulfatos

Son sales moderadamente solubles y muy solubles que provienen de las rocas. Las aguas dulces contienen de 2 a 150 mg/L y el agua de mar cerca de 3,000 mg/L, aunque en agua pura se satura a unos 1500 mg/L, como SO_4Ca . La presencia de otras sales aumenta su solubilidad (Rigola, 1990).

2.2.2.7.3. Nitratos

Forman sales solubles y estables, aunque en un medio reductor pueden predominar NO_2^- , N o NH_3^- . Las aguas normales contienen menos de 10 mg/L y el agua de mar hasta 1 mg/L, pero las aguas contaminadas, principalmente por fertilizantes, pueden llegar a varios centenares de mg/L.

Es posible eliminarlos por intercambio iónico, pero no es un método económico en los procesos de potabilización en grandes volúmenes. Su presencia en las aguas superficiales, conjuntamente con PO_4^{3-} , determinan la eutrofización, que se caracteriza por un excesivo crecimiento de algas (Rigola, 1990).

2.3. **Suelos**

El suelo está compuesto por minerales, materia orgánica, diminutos organismos vegetales y animales, aire y agua. Es una capa que se ha formado muy lentamente, a través de los siglos, con la desintegración de las rocas superficiales por la acción del agua, los cambios de temperatura y el viento. Las plantas y animales que crecen y mueren dentro y sobre el suelo son descompuestos por los microorganismos, transformados en materia orgánica y mezclados con el suelo (FAO, 2009).

La calidad del suelo es variable y los suelos responden de forma distinta conforme las prácticas implementadas sobre él. Se incluyen los elementos de la calidad del suelo; las propiedades físicas, químicas y biológicas inherentes y dinámicas.

La calidad del suelo se define como “la capacidad del suelo de funcionar, dentro de las fronteras del ecosistema y el uso de la tierra, manteniendo la calidad ambiental, sosteniendo la productividad de plantas y animales y de sustentar la salud humana” (FAO, 2009).

2.3.1. **Tipos de suelos en la cuenca del Lago de Cuitzeo**

Se utilizaron los datos vectoriales de la carta Edafológica de INEGI (1979) a escala 1:250,000. El INEGI clasificó las unidades de suelo se utilizó la Leyenda de Suelos FAO/UNESCO 1968 modificada por la Dirección de Estudios del Territorio Nacional (DETENAL) en 1970. Los principales suelos que se presentan en la cuenca en orden de abundancia son, de acuerdo a Arcelia-Cabrera, *et al.* son:

Vertisoles (33.31%), presentan alto contenido de arcillas (>30%). Son suelos profundos y fértiles y por su propiedades físicas y el régimen de humedad, son susceptibles al anegamiento, presentan alta agresividad cuando el suelo esta mojado y son muy duros estando secos.

Luvisoles (16.75), son ácidos y están fuertemente meteorizados. Tienen mayor contenido de arcillas en el horizonte Bt que el suelo superficial. Tienen una

saturación de bases >50% y ocurren principalmente en áreas de pendientes suaves. Son suelos susceptibles de sufrir compactación por efecto del pastoreo y con frecuencia presentan erosión por cárcavas.

Andosoles (11.39%), los cuales se originan a partir de cenizas volcánicas y en los cuales se desarrollan bosques de pino-encino. Se localizan en áreas con alto potencial de recarga de agua en la cuenca y son susceptibles a erosión hídrica cuando carecen de buena cobertura vegetal.

Acrisoles (10.01%), son suelos con una saturación de bases >50%, debido a que se presentan en zonas de pendientes onduladas y pronunciadas que favorece el lavado de bases. Las limitantes asociadas a la agricultura son la fijación de fósforo y la toxicidad por hierro y aluminio solubles, por lo que son recomendables las enmiendas de encalado para incrementar el pH y el uso de fertilizantes de reacción alcalina.

Phaeozem (9.84%), son de color oscuro y ricos en materia orgánica, con saturación de bases mayor al 50% en los primeros 100 cm. se localizan en zonas llanas a onduladas de pendientes suaves. Son excelentes tierras agrícolas por presentar buen drenaje y fertilidad.

2.3.2. Parámetros físicos y químicos del suelo

Los parámetros físicos y químicos del suelo sirven, al igual que los del agua, para determinar la calidad del mismo con respecto al uso que se requiera. Los parámetros utilizados en el estudio son los siguientes:

2.3.2.1. Textura

La textura del suelo se refiere a la proporción de componentes inorgánicos de diferentes formas y tamaños como arena, limo y arcilla. La textura es una propiedad importante que influye en la fertilidad y en la habilidad de retener agua, aireación, drenaje, contenido de materia orgánica y otras propiedades.

El triángulo de textura de suelos, según la FAO, se usa como una herramienta para clasificar la textura. La fracción menor de 2 mm se le denomina tierra fina y en ella se centran los estudios de suelos ya que es la responsable de las propiedades físicas, químicas, fisicoquímicas y biológicas de los suelos. (FAO, 2009).

2.3.2.2. **pH**

El pH (potencial de hidrógeno) determina el grado de adsorción de iones (H^+) por las partículas del suelo e indica si un suelo es ácido o alcalino. Es el indicador principal en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, influyendo en la solubilidad, movilidad, disponibilidad y de otros constituyentes y contaminantes inorgánicos presentes en el suelo. El valor del pH en el suelo oscila entre 3.5 (muy ácido) a 9.5 (muy alcalino). Los suelos muy ácidos (<5.5) tienden a presentar cantidades elevadas y tóxicas de Al y Mn. Los suelos muy alcalinos (>8.5) tienden a dispersarse. La actividad de los organismos del suelo es inhibida en suelos muy ácidos y para los cultivos agrícolas el valor del pH ideal se encuentra en 6.5 (FAO, 2009).

2.3.2.3. **Conductividad eléctrica**

La concentración de sales solubles presentes en la solución del sustrato se mide mediante la conductividad eléctrica (CE). La CE es la medida de la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica, el valor será más alto cuanto más fácil se mueve la corriente a través del mismo. Esto significa que a mayor CE, mayor es la concentración de sales (FAO, 2009).

2.4. **Contaminación**

La contaminación ocurre cuando un elemento o una sustancia está presente en concentraciones mayores a lo natural como resultado de la actividad humana, provocando un efecto negativo sobre el medio ambiente y sus componentes (Kabata-Pedias, 2011). La contaminación puede ser de origen natural, aunque en general está relacionada con las actividades del hombre, debido a su búsqueda de supervivencia y bienestar (Bautista, 1999).

2.4.1. **Contaminación del agua**

Se considera como “contaminante” al exceso de materia o energía (calor) que provoque daño a los humanos, animales, plantas y bienes, o bien, que perturbe negativamente las actividades que normalmente se desarrollan cerca o dentro del agua.

De esta forma, no existe una división precisa entre las aguas contaminadas y las no contaminadas; este calificativo se atribuye en función del uso, las exigencias higiénicas y del grado de avance de la ciencia y tecnología para determinar los efectos y medir los contaminantes. A pesar de la dificultad para definir la contaminación, es claro que ésta provoca el abatimiento o muerte de la flora y fauna, impide el uso del agua en industrias o ciudades y deteriora el medio ambiente e incluso, el paisaje (Jiménez, 2001).

2.4.2. **Fuentes de contaminación del agua**

Fuentes naturales.- Dependiendo de los terrenos que atraviesa el agua puede contener componentes de origen natural procedentes del contacto con la atmósfera

y el suelo (Ej. sales minerales, Ca, Mg, Fe, etc.). Aunque pueden ser nocivos para la salud, en general son sustancias que se pueden identificar fácilmente y eliminar.

Fuentes antropogénicas.- Producidas como consecuencia de las actividades humanas, como la agricultura, ganadería, la minería y el sector industrial; han provocado la presencia de ciertos componentes que son peligrosos para el medio ambiente y para los organismos y además son difíciles de eliminar.

2.4.3. Contaminación del suelo

Un suelo contaminado es aquel que ha sufrido un cambio en sus características físicas, químicas o biológicas que, por su naturaleza, dimensión o duración en el tiempo resulte incompatible con sus propiedades funcionales de uso o suponga una amenaza grave para la salud pública o el ambiente. (Fernández y García, 2013 en Mijangos-Ávila, 2014)).

Entre las principales funciones del suelo están: a) La capacidad para aceptar, mantener y liberar nutrientes y otros constituyentes químicos; b) aceptar, mantener y liberar agua a las plantas y recarga de mantos de aguas superficiales y profundas; c) promover y mantener el crecimiento de raíces; d) mantener adecuado el hábitat biótico del suelo y e) responder al manejo y resistir a la degradación (Larson y Pierce, 1994).

2.4.4. Fuentes de contaminación del suelo

- La disposición inadecuada de residuos peligrosos en terrenos baldíos, bodegas, almacenes e instalaciones industriales.
- Las fugas de materiales peligrosos (en especial los hidrocarburos y sus derivados) de tanques, contenedores subterráneos, tuberías y ductos.

- La lixiviación de residuos peligrosos en sitios de almacenamiento y en sitios donde se desarrollan actividades de manejo de residuos peligrosos.
- Los derrames de sustancias químicas por accidentes de transporte.
- La disposición inadecuada de residuos peligrosos o sólidos contaminados con éstos en los sitios de disposición final para residuos sólidos urbanos. (SEMARNAT, 2010).

2.4.5. Normas Oficiales Mexicanas (NOM)

Las NOM son regulaciones técnicas de las distintas dependencias gubernamentales para establecer parámetros evaluables con el fin de evitar riesgos en la población, los animales y el medio ambiente.

Los límites permisibles de calidad del agua, se establecieron de acuerdo al uso que se dé, ya sea consumo humano, público, recreativo, agrícola, etc.

Las normas oficiales tratadas en el documento son las que se presentan en la Tabla 1:

Tabla 1. Normas Oficiales Mexicanas utilizadas.

Norma	Establece
NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 1994)	“Salud ambiental, agua para uso y consumo humano – Límites permisibles de calidad y tratamientos a los que debe someterse el agua para su potabilización”
NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1996 a)	“Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales”
NOM-001-ECOL-1996 (DOF, 1996 b)	“Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales”

Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011)	“Guía de calidad del agua”
NOM-159-SEMARNAT-2011 (DOF, 2011)	“Requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre”

Tabla 2. Concentraciones máximas permitidas en el agua según su uso de acuerdo a las normas mexicanas.

Elemento	NOM 127-SSA1-1994	NOM 001 SEMARNAT 1996		NOM 001 ECOL 1996	OMS*	NOM-159-SEMARNAT-2011
	Uso					
	Público urbano	Público urbano	Riego agrícola	Público urbano	Potable	Suelo
	mg/L					mg/kg
As	0.05	0.2	0.4	0.1	0.010	100
Cu	2.00	6.0	6.0	4.0	3.0	1000
Zn	5.00	10	10	20	15.0	1000
Fe	0.30	-	-	-	0.3	-

*OMS = Organización Mundial de la Salud

2.4.6. Perspectivas nacionales y locales

La contaminación del suelo es ocasionada principalmente por la disposición inadecuada de los residuos que se generan de las actividades agrícolas, industriales y municipales.

En Michoacán, el conocimiento sobre la cantidad y la composición de los residuos sólidos municipales es escaso, ya que no existen sistemas de monitoreo permanentes. Los datos disponibles proceden de investigaciones realizadas en zonas urbanas, por lo que el desconocimiento de las tasas de generación y composición de los residuos sólidos municipales para zonas rurales es aún mayor. No obstante, las diferencias en el ingreso económico y la dispersión geográfica de

la población determinan en el sector rural tasas de generación per cápita menores, y un amplio rango de estacionalidad (González, 2011).

La legislación ambiental mexicana con relación a los suelos establece los límites permisibles del Pb (400 mg/kg), V (78 mg/kg), Ni (1,600 mg/kg) y Cr (280 mg/kg) para los usos de suelo agrícola, residencial y comercial en la NOM-147 (SEMARNAT, 2007).

Tabla 3. Valores de calidad promedios de suelos conservados en el valle Morelia-Queréndaro. Profundidad 0-30 cm (SAGARPA, 2011).

Parámetro	Valor
pH	7.28
Materia Orgánica (%)	3.86
Arena (%)	27.3
Limo (%)	32.0
Arcilla (%)	40.7

En la localidad de Capula la principal actividad económica es la alfarería, la cual es la que representa una probable fuente de contaminación por residuos sólidos y metales traza en el suelo.

La alfarería vidriada con plomo fue introducida a las costumbres de los alfareros mexicanos por los españoles en 1519, pues hasta entonces tapaban el poro de la cerámica a base de bruñido con piedras. El plomo demostró ser un material duro y resistente, pero más importante resultó que su cocción era posible a temperaturas relativamente bajas de entre 600 y 850 grados, lo cual resolvía antiquísimos conflictos de filtración de líquidos y ahorra tiempo y trabajo a sus productores. El vidriado con plomo, llamado desde entonces greta, se sigue usando hoy con singular despreocupación (Noyola, 2017).

En el Informe 2010 del Fondo Nacional para el Fomento de las Artesanías (FONART) y Blacksmith Institute, llamado Uso del plomo en la alfarería en México, se exponen los riesgos sanitarios y las consecuencias ambientales del uso del plomo en la alfarería. A pesar de eso no existe una legislación local o internacional

que regule los límites permisibles de los residuos sólidos y de metales traza derivados de esta actividad.

2.5. **Metales pesados**

Los metales traza son de gran interés debido a que tienen efectos negativos sobre la salud humana, ya que la presencia de éstos en los alimentos ocasionan daño a quien los consume.

La importancia que tiene el estudio de metales pesados en aguas y sedimentos es por su elevada toxicidad, alta persistencia y rápida acumulación por los organismos vivos. Los efectos tóxicos de los metales pesados no se detectan fácilmente a corto plazo, aunque sí puede haber una incidencia muy importante a medio y largo plazo. Los metales son difíciles de eliminar del medio, puesto que los propios organismos los incorporan a sus tejidos y éstos a sus depredadores, en los que se acaban manifestando. La toxicidad de estos metales pesados es proporcional a la facilidad de ser absorbidos por los seres vivos. Un metal disuelto en forma iónica puede absorberse más fácilmente que estando en forma elemental, y si ésta se encuentra reducida finamente aumentan las posibilidades de su oxidación y retención por los diversos órganos.

Los metales traza determinados en el presente trabajo son los siguientes:

2.5.1. **Arsénico (As)**

Puede estar presente en el agua en forma natural y se encuentra en forma trivalente o pentavalente, tanto en compuestos inorgánicos como orgánicos. La toxicidad del As es compleja, pues depende de la vía de exposición, del estado de valencia y de la forma química (inorgánica u orgánica) del compuesto (Barrenechea, 2013, pag. 20). En cuanto a las especies oxidadas, generalmente las sales inorgánicas de As (III) son más tóxicas que las de As (V) y la solubilidad de los compuestos de arsénico

inorgánico está relacionada con su toxicidad; todos los compuestos solubles son tóxico compuesto (Barrenechea-Martel, 2013, pág. 20).

El metabolismo del As se realiza principalmente en el hígado, aunque su mecanismo no está bien establecido. La remoción de arsénico del agua se basa principalmente en su oxidación a su forma pentavalente antes de la coagulación con sulfato férrico a pH de 6 a 8, con alumbre a pH de 6 a 7 o ablandamiento con cal a pH 11. A escala experimental, este método ha permitido una remoción de 90% de arsénico compuesto (Barrenechea-Martel, 2013, pág. 21).

Debido a sus efectos adversos sobre la salud y a la insuficiente información sobre su remoción del agua, la EPA y las guías canadienses recomiendan que el contenido de arsénico en fuentes de abastecimiento no exceda 0.05 mg/L. El valor guía de la OMS para el agua de bebida es 0.01 mg/L compuesto (Barrenechea-Martel, 2013, pág. 21).

2.5.2. **Cobre (Cu)**

Con frecuencia se encuentra en forma natural en las aguas superficiales, pero en concentraciones menores a un mg/L (Barrenechea-Martel, 2013, pág. 26). En estas concentraciones, el cobre no tiene efectos nocivos para la salud. Sin embargo, si se ingiere agua contaminada con niveles de cobre que superan los límites permitidos por las normas de calidad, a corto plazo pueden generarse molestias gastrointestinales. Exposiciones al cobre a largo plazo podrían causar lesiones hepáticas o renales (Barrenechea-Martel, 2013, pág. 27).

La presencia del cobre en el agua está relacionada principalmente con la corrosión de las cañerías en la vivienda, la erosión de depósitos naturales y el percolado de conservantes de madera, entre otros. En algunos sistemas se aplica sulfato de cobre en dosis controladas como mecanismo para combatir las algas en el agua. Las dosis van de 0.1 a 2 mg/L. En concentraciones altas, el cobre puede favorecer la corrosión del aluminio y el zinc y cambiar el sabor del agua (Barrenechea-Martel, 2013, pág. 27).

La EPA ha establecido una concentración máxima de 1.3 mg/L, que denomina *nivel de acción*; es decir, una concentración límite que sirve como un aviso para que los sistemas públicos de suministro de agua tomen medidas de tratamiento (si es necesario, adicionales) cuando los niveles de las muestras de agua superan en más de 10% los valores permitidos (Barrenechea-Martel, 2013, pág. 27).

Las Guías de Calidad para Agua de Bebida del Canadá han recomendado un límite de 1 mg/L de cobre en aguas destinadas al consumo humano (Barrenechea-Martel, 2013, pág. 27).

2.5.3. Zinc (Zn)

Es uno de los elementos más comunes en la corteza terrestre. Se encuentra en el aire, suelo y agua y está presente en todos los alimentos. Se adhiere al suelo, sedimentos y a partículas de polvo en el aire y dependiendo del tipo de suelo, algunos compuestos de Zn pueden movilizarse al agua subterránea, lagos, arroyos y ríos. Se acumula en peces y en otros organismos, pero no en plantas (ATSDR, 2005, CAS # 7440-66-6).

La ingestión de grandes cantidades de Zn puede causar calambres estomacales, náuseas y vómito; si se ingiere por periodos largos ocasiona anemia y disminuye los niveles del colesterol benéfico. (ATSDR, 2005, CAS # 7440-66-6). La inhalación de grandes cantidades de polvos o vapores de Zn puede producir una enfermedad de corta duración llamada fiebre de vapores de metal (ATASDR, 2005, CAS # 7440-66-6).

2.5.4. Hierro (Fe)

El Fe es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre. Se encuentra en corrientes naturales de agua en concentraciones que varían de 0.5 a 50 mg/L.

El Fe en el agua no presenta problemas graves de toxicidad. Pero en concentraciones superiores a 0.3 mg/L le produce un color amarillento y a partir de 1 mg/L genera un sabor amargo y astringente. El Fe tiñe de color café a los textiles, la plomería y las paredes. La precipitación del exceso de Fe produce lo que se conoce como herrumbre, que es de color pardo rojizo. Cuando hay más de 0.1 mg/L, se deposita y para concentraciones de más de 0.3 mg/L, provoca el aumento de los costos de mantenimiento de las tuberías (Jiménez-Cisneros, 2005).

2.5.5. Disponibilidad

La posibilidad de que un elemento (contaminante o no) quede libre y pase a disolución en un suelo se llama disponibilidad. Un metal puede estar disponible en el suelo por volatilización, disolución, lixiviado o erosión (Newman y Jagoe, 1994). Para que un metal esté disponible en el ambiente depende de factores de movilidad y geoedáficos.

La movilidad de un metal depende no sólo de su especiación química, sino de una serie de parámetros del suelo tales como pH, materia orgánica, carbonatos, minerales de arcilla, etc. Así, no todos los cationes de cambio están igualmente disponibles, sino que depende del mineral o minerales de los que están formando parte como complejo de cambio. Cuando el metal está precipitado, no se comportará igual si lo hace como carbonato, sulfato o fosfato. Tampoco será lo mismo que el metal se encuentre formando parte de un sulfuro (relativamente oxidable y solubilizable) que de un silicato (prácticamente resistente en todos los medios) (Newman y Jagoe, 1994).

En general, la movilidad de los metales pesados es muy baja, quedando acumulados en los primeros centímetros del suelo, siendo lixiviados a los horizontes inferiores en muy pequeñas cantidades. Esto quiere decir que la disponibilidad de un elemento no solo depende de la concentración del elemento sino también de las características del suelo en donde se encuentra. Los parámetros geoedáficos llegan

a ser esenciales para valorar la sensibilidad de los suelos a la disponibilidad de los metales traza (Bourg, 1995).

a) pH. La mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido porque son menos fuertemente adsorbidos, excepto el As, Mo, Se y Cr, que son más móviles a pH alcalino (Bourg, 1995).

b) Textura. Los suelos arcillosos retienen más metales por adsorción o en el complejo de cambio de los minerales de la arcilla. Por el contrario, los arenosos carecen de capacidad de fijación y puede contaminarse el nivel freático (Bourg, 1995).

c) Mineralogía de arcillas. Cada mineral de la arcilla tiene unos determinados valores de superficie específica y de descompensación eléctrica. Cuanto mayor es la superficie activa de un filosilicato, mayores son sus posibilidades de adsorber metales. Esta capacidad de adsorción será máxima en el punto de carga cero superficial, cuando su competencia con los H^+ es mínima, lo que se consigue a diferentes pH según el mineral (Sposito, 1989). Sin embargo, la importancia de los minerales de la arcilla como adsorbentes es secundaria cuando en un suelo existe abundante materia orgánica y/o oxihidróxidos de hierro, componentes más competitivos (Galán, 2000).

d) Materia orgánica. Reacciona con los metales formando complejos de cambio o quelatos. La adsorción puede ser tan fuerte que quedan estabilizados (como el caso del Cu) o forman quelatos también muy estables, como puede pasar con el Pb y Zn. En muchos casos, se forman complejos organometálicos lo que facilita la solubilidad del metal, la disponibilidad y dispersión porque pueden degradarse por los organismos del suelo. Esto conduce a una persistencia de la toxicidad (Baize y Sterckeman, 2001).

e) Capacidad de cambio. La capacidad de intercambio catiónico depende del tipo de minerales de la arcilla, de la materia orgánica, de la valencia y del radio iónico hidratado del metal. A mayor tamaño y menor valencia, menos frecuentemente quedan retenidos (Baize y Sterckeman, 2001).

f) Condiciones redox. El potencial de oxidación-reducción es responsable de que el metal se encuentre en estado oxidado o reducido. Los diagramas Eh-pH se utilizan para mostrar la estabilidad de los compuestos metálicos y proporcionan un método fácil para predecir el comportamiento de los metales pesados frente a un cambio de las condiciones ambientales (Föstner, 1987).

g) Carbonatos. La presencia de carbonatos garantiza el mantenimiento de los pH altos y en estas condiciones tienden a precipitar los metales pesados. El Cd y otros metales tienden a quedar adsorbidos por los carbonatos (Sposito, 1989).

h) Óxidos e hidróxidos de Fe y Mn. Juegan un importante papel en la retención de metales pesados y en su inmovilización. Se encuentran finamente diseminados en la masa de suelo por lo que son muy activos. Por su baja cristalinidad y pequeño tamaño de partícula, tienen una alta capacidad sorcitiva para metales divalentes, especialmente Cu y Pb, y en menor extensión Zn, Co, Cr, Mo, Ni y también As (Galán, 2000).

i) Salinidad. El aumento de la salinidad puede incrementar la movilización de metales y su retención por dos mecanismos. Primeramente, los cationes Na y K pueden reemplazar a metales pesados en lugares de intercambio catiónico. En una segunda fase, los aniones cloruro y sulfato pueden formar compuestos más estables con metales tales como Pb, Zn, Cu, Cd y Hg. Por otra parte, las sales normalmente dan pH alcalino (Sposito, 1989).

2.6. Espectroscopia de Absorción Atómica

La espectroscopia por absorción atómica (ASS, por sus siglas en inglés) consiste en transformar la muestra problema (que puede encontrarse en disolución o sólida) en átomos en estado de vapor y medir la radiación electromagnética absorbida por dichos átomos. Está basada en la absorción de radiación de energía por átomos libres.

La capacidad de un átomo de absorber a longitudes de onda específica es utilizada en la espectroscopia de absorción atómica. La cantidad de medida de interés en absorción atómica, es la medida de luz a cierta longitud de onda la cual es absorbida cuando la luz pasa a través de una nube de átomos. Cuando el número de átomos en la trayectoria de la luz incrementa, la cantidad de luz absorbida incrementa en una forma predecible. Midiendo la cantidad de luz absorbida, puede realizarse una determinación cuantitativa de la cantidad del elemento presente (Rocha-Castro, 2000).

El uso de fuentes de luz especiales y una cuidadosa selección de longitud de onda permite la determinación cuantitativa de los elementos individuales en la presencia de otros. La nube de átomos requerida para mediciones de absorción atómica es producida proporcionando la energía térmica suficiente para la disociación de los compuestos químicos en átomos libres. Aspirando una solución de la muestra en una flama alineada en el haz de luz sirve para este propósito. Bajo las condiciones propias de la flama, la mayoría de los átomos permanecerán en estado fundamental y serán capaces de absorber luz a la longitud de onda analítica de una fuente de luz (Figura 3) (Skoog, 1998).

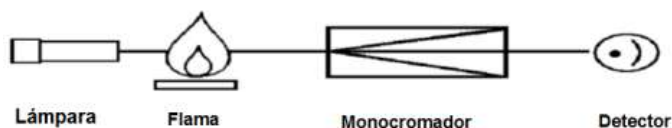


Figura 3. Esquema básico de absorción atómica.

3. ÁREA DE ESTUDIO

3. Área de estudio

3.1. Localización geográfica

El estado de Michoacán se localiza en la parte centro occidente de la República Mexicana entre los paralelos $17^{\circ}54'34''$ y $20^{\circ}23'37''$ de latitud norte y los $100^{\circ}03'23''$ y $103^{\circ}44'09''$ de longitud oeste, a una altura de 640 msnm. Limita al norte con Jalisco y Guanajuato, al sur con Guerrero y el Océano Pacífico, al este con el Estado de México y Querétaro y al oeste con Jalisco y Colima.



Figura 4. Ubicación regional del área de estudio.

La región de Capula se localiza al norte del estado, limitando al este con la ciudad de Morelia, al oeste con Quiroga, al norte con la comunidad de Tristarán y al sur con

el cerro del Águila. La comunidad abarca un área aproximada de 10 km² y es atravesada por una corriente de agua proveniente del cerro del Águila. Dicha corriente también atraviesa la comunidad de Irtazio antes de llegar a Capula.

La principal vía de comunicación es la carretera federal Morelia-Capula, la que comunica gran parte de las comunidades cercanas a la zona de estudio.

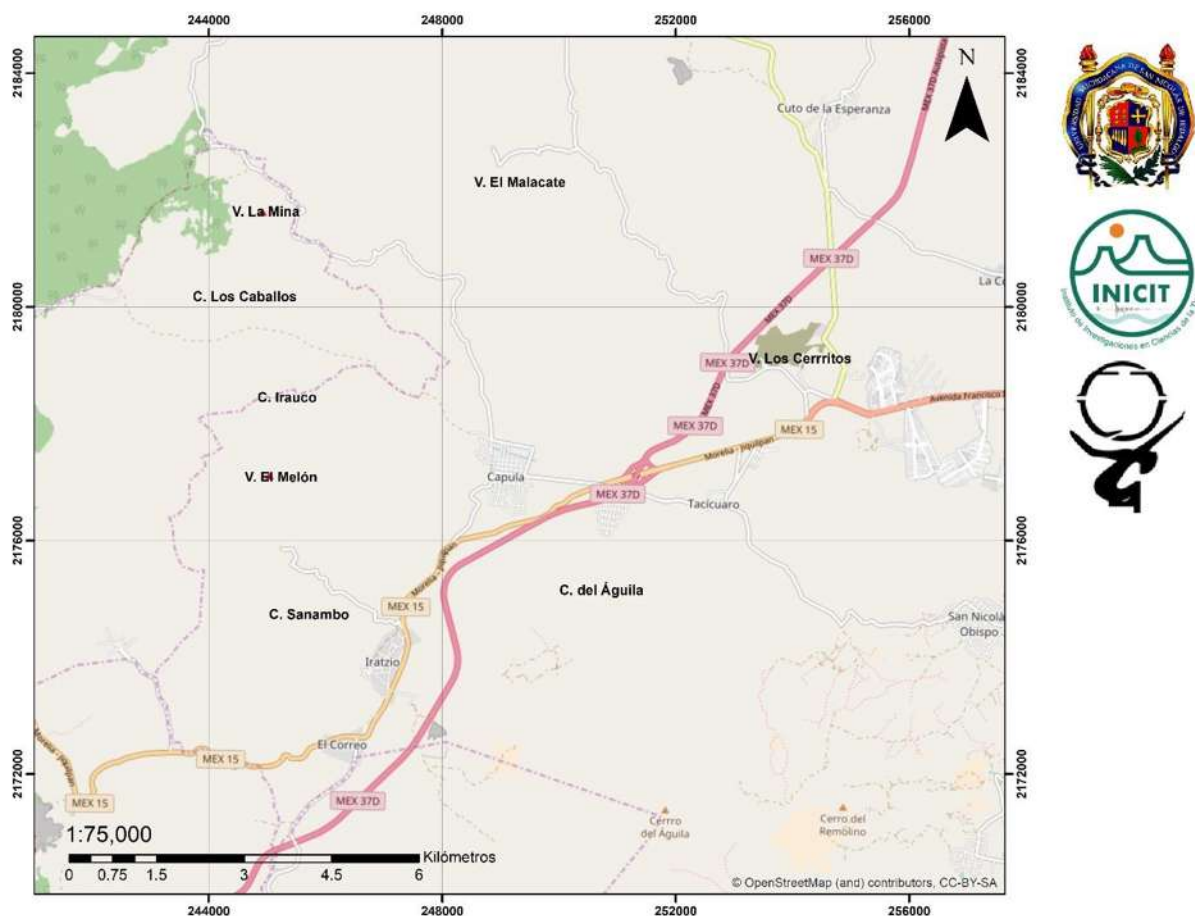


Figura 5. Ubicación y vías de comunicación del área de estudio.

3.2. Orografía y fisiografía

La zona de estudio pertenece a la provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), distribuido en dirección este-oeste atravesando la

República Mexicana. Se aprecia un paisaje de vulcanismo reciente con conos cineríticos, producto del vulcanismo monogenético del corredor Tarasco (Garduño-Monroy *et al.*, 2010), con derrames de lavas andesíticas y basálticas y grandes planicies de aluvión en la comunidad de Capula.

Las principales elevaciones cercanas al área de estudio son el volcán Quinceo al NE, el cerro del Águila al Sur y el volcán Tzirate al NO. Se observan elevaciones más pequeñas como el volcán El Melón al Oeste, los volcanes Los Caballos y La Mina al NO, el volcán el Malacate al Norte y el volcán Los Cerritos al Este. El terreno presenta pendiente de 0 a 5°, siendo el cerro del Águila la elevación más accidentada así como los conos cineríticos ubicados en la zona.

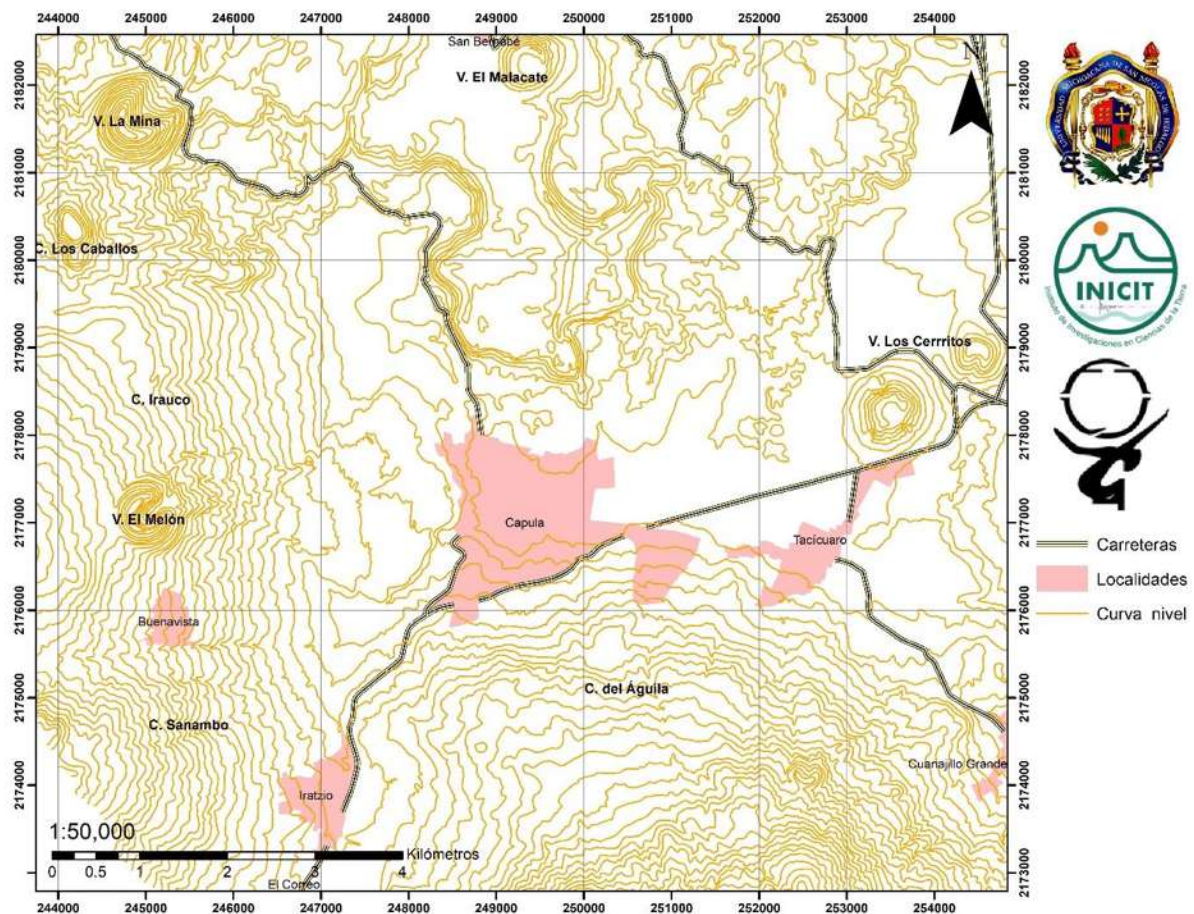


Figura 6. Principales elevaciones del área de estudio.

3.3. Hidrología

La zona se localiza en la Región Hidrológica número 12, conocida como el sistema Lerma-Chapala-Santiago. Naturalmente la cuenca es cerrada pero se une artificialmente por sistemas de canales que la comunican con el lago de Yuriria y con el Río Lerma.

La zona de estudio representa la desembocadura de una red de escurrimientos superficiales provenientes de las zonas montañosas, los cuales son de tipo intermitentes y en su mayoría de 2do orden, lo que significa que los tipos de corrientes son efímeras.

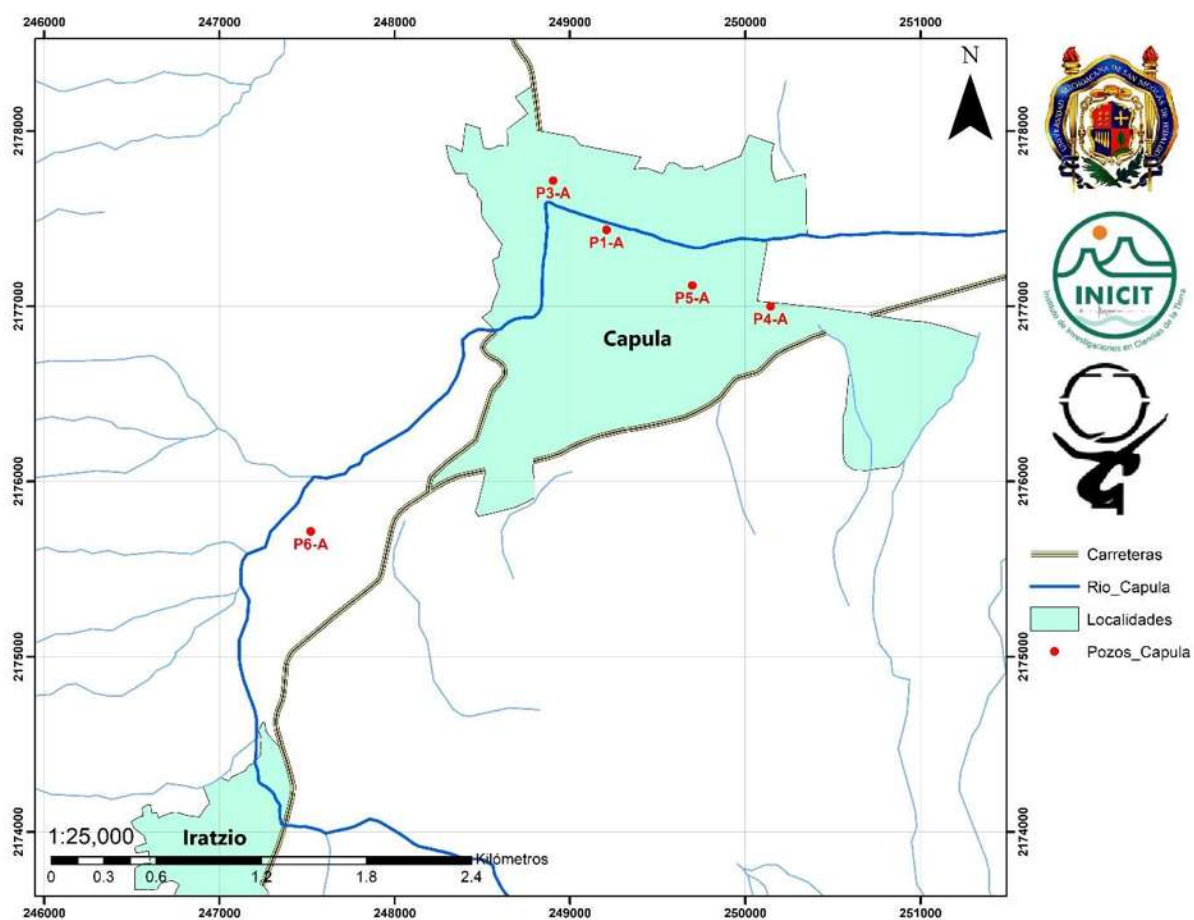


Figura 7. Corriente principal que atraviesa la comunidad de Capula y la ubicación espacial de los pozos de agua subterránea muestreados.

La comunidad de Capula es atravesada por una corriente proveniente del cerro del Águila que atraviesa previamente a la comunidad de Iratzio y desemboca en la comunidad de Tacícuaro, con la cual se unen corrientes provenientes de los cerros Irauco y Sanambo. En el área de estudio se localizan seis pozos de extracción de agua subterránea, dos que abastecen a la comunidad de Capula y colonias aledañas, uno más abastece a las comunidades de Joyitas y San Bernabé, otro a la comunidad de Buenavista, el siguiente a la comunidad de Iratzio y finalmente, el ultimo es propiedad privada, el cual se usa únicamente para el consumo del ganado y el riego de las plantas.

3.4. Geología

La zona de estudio presenta rasgos estructurales en dirección NE-SO, la cual tiene como límite al sur a la Sierra Madre del Sur, denominada para la zona de Morelia como la Sierra de Mil Cumbres (Silva-Mora, 1979). Predomina un paisaje de vulcanismo reciente y depósitos aluviales, producto del corredor Tarasco. El sustrato consiste de depósitos lacustres, fluvio-lacustres y epiclásticos afectados por dos sistemas de fallas con dirección NE-SO y E-O (Garduño *et al.* 1999).

Verduzco-Cedeño (2010) destacó la presencia de un cuerpo basáltico afanítico de color oscuro con textura de micro-estructuras de flujo, localizada al oeste y NO de la zona de estudio, en los poblados de Jasso, Sajo Grande y Sajo Chico, así como los volcanes La Mina, Los Caballos y El Melón. Menciona que el material volcánico presenta una densidad mayor a la piedra pómez con cambios de textura. El material presente en los conos cineríticos es escoráceo con tamaños de bloques, arenas y gravas.

A partir de los registros de datos de perforaciones realizadas en fuentes de agua potable, se determinó que para la zona de Capula se localiza un sustrato basáltico que va desde los 2,040 hasta cerca de los 2,070 msnm., sobreyaciéndolo un depósito de aluvión con espesor cercano a los 10 m. Esta zona está limitada al

Oeste por un derrame de lava andesítica del volcán El Melón, asentado encima del cerro Irauco, al Sur por el cerro del Águila, al Norte por lavas andesítico-basálticas del volcán El Malacate y al Este por una alineación de volcanes cineríticos como Los Cerritos y el volcán El Pelón, producto del sistema de fallas de la región Morelia-Capula, las cuales se observan tanto en superficie como a profundidad y de donde se extraen arenas volcánicas y tobas (Israde *et al.*, 1999).

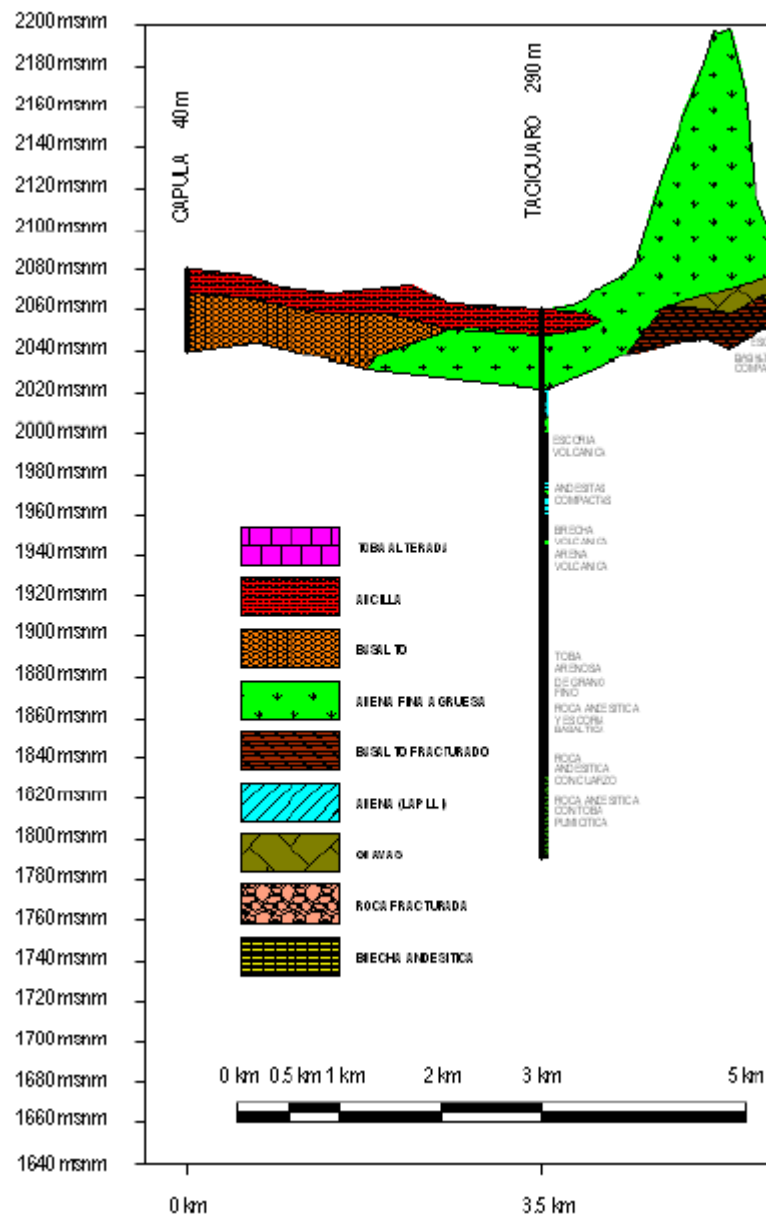


Figura 8. Perfil estratigráfico de la zona de estudio (Tomado de Verduzco-Cedeño, 2010).

3.5. Suelos

En orden de abundancia, las unidades de suelo en la cuenca del Lago de Cuitzeo ocupan la siguiente superficie: Vertisoles, con 135,731 ha que corresponden al 33.31% de la cuenca; Luvisoles 68,237 ha (16.75%); Andosoles 46,431 ha (11.39%); Acrisoles 40,773 (10.01%) y Phaeozem 40,084 ha (9.84%).

El 9.04% de la superficie restante de la cuenca lo comprenden las unidades cartográficas Leptosol (anteriormente llamado Litosol) Solonchak, Planosol, Gleysol y Cambisol. El restante 9.85% de la superficie (40,144 ha) corresponde a cuerpos de agua y humedales (Mendoza, 2002 en Gómez-Tagle, 2008).

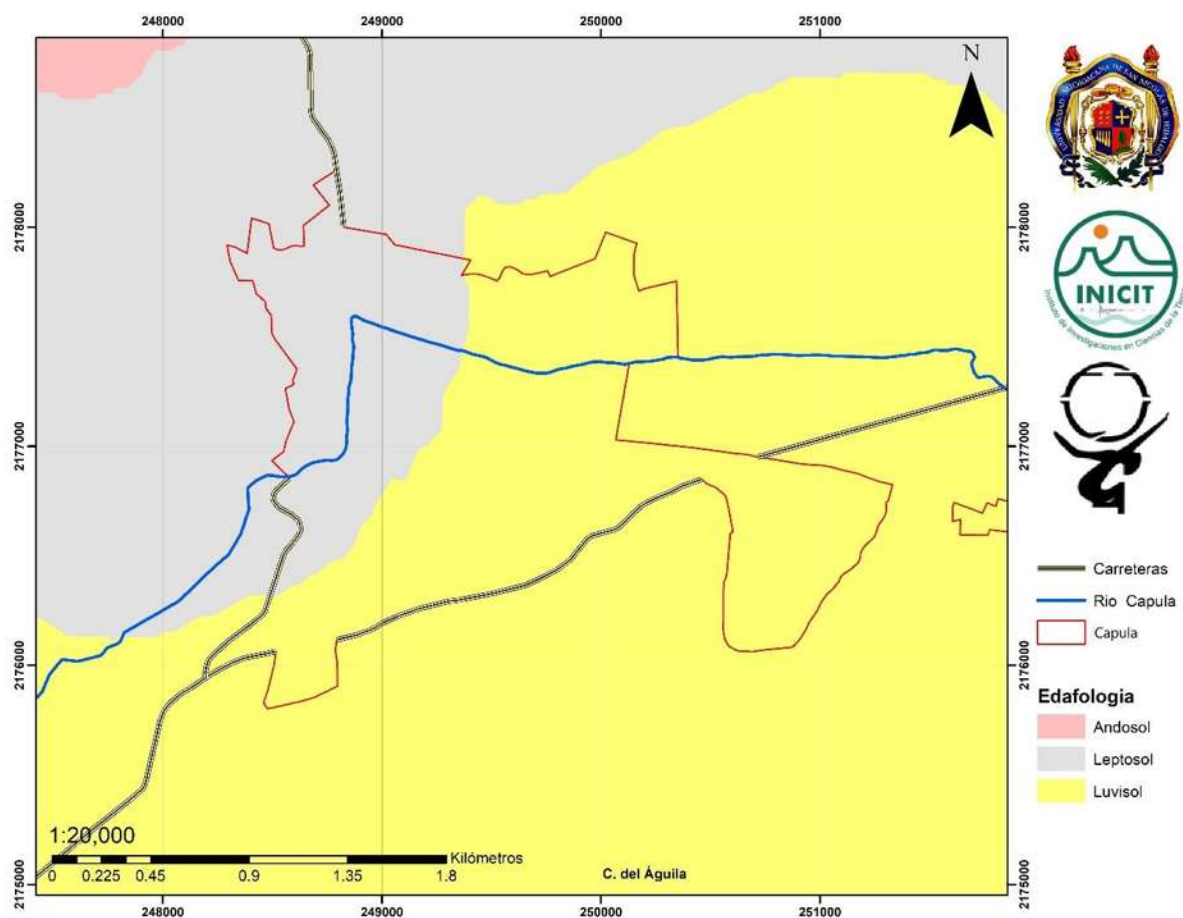


Figura 9. Tipos de suelo del área de estudio de acuerdo a la carta edafológica de INEGI (1979) a escala 1:250,000.

Específicamente para la comunidad de Capula donde se realizó el muestreo de agua y suelo existen dos tipos de suelo con la misma superficie, de acuerdo a la carta edafológica de INEGI a escala 1:250,000 y donde la parte NO corresponde a Leptosol (anteriormente llamado Litosol) y la parte SE corresponde a Luvisol.

3.6. Clima

En la zona predomina el clima del subtipo templado de humedad media con régimen de lluvias en verano de 700 a 1,000 mm de precipitación anual y lluvias invernales máximas de 5 mm anuales en promedio. La temperatura anual promedio es de 17°C con la mínima mensual promedio de 10.8°C y la máxima mensual promedio de 25°C. Los vientos predominantes provienen del SO y del NO, con variaciones en julio, agosto y octubre con intensidades de 2 a 14.5 km/h.

3.7. Cobertura y uso de suelo

López *et al.* (2006) mencionan que para el año 2000, el 23.7% de la cuenca (94,956 ha) comprendía matorrales, los cuerpos de agua abarcaban cerca del 7% (30,162 ha) y los humedales 5,720 ha (1.4%). El bosque templado comprendía 78,544 ha (19.6%), la agricultura de temporal 74,385 ha (18.5%) y la agricultura de riego 62,313 ha (15.5%). En cuanto a los asentamientos humanos, estos abarcaron el 4.8% de la cuenca con 19,416 ha, mientras que las áreas erosionadas, los huertos y plantaciones forestales ocuparon 2.6% de la superficie de la cuenca.

De acuerdo a la carta de cobertura y uso del suelo del INEGI (1979) a escala 1:250,000 se distinguieron tres coberturas vegetales en el área. La de mayor superficie corresponde a cultivo de temporal, posteriormente la zona Sur está representada como bosque de encino y la parte Este son pastizales inducidos. Es

importante señalar que gran parte de la zona está ocupada por las construcciones del poblado.

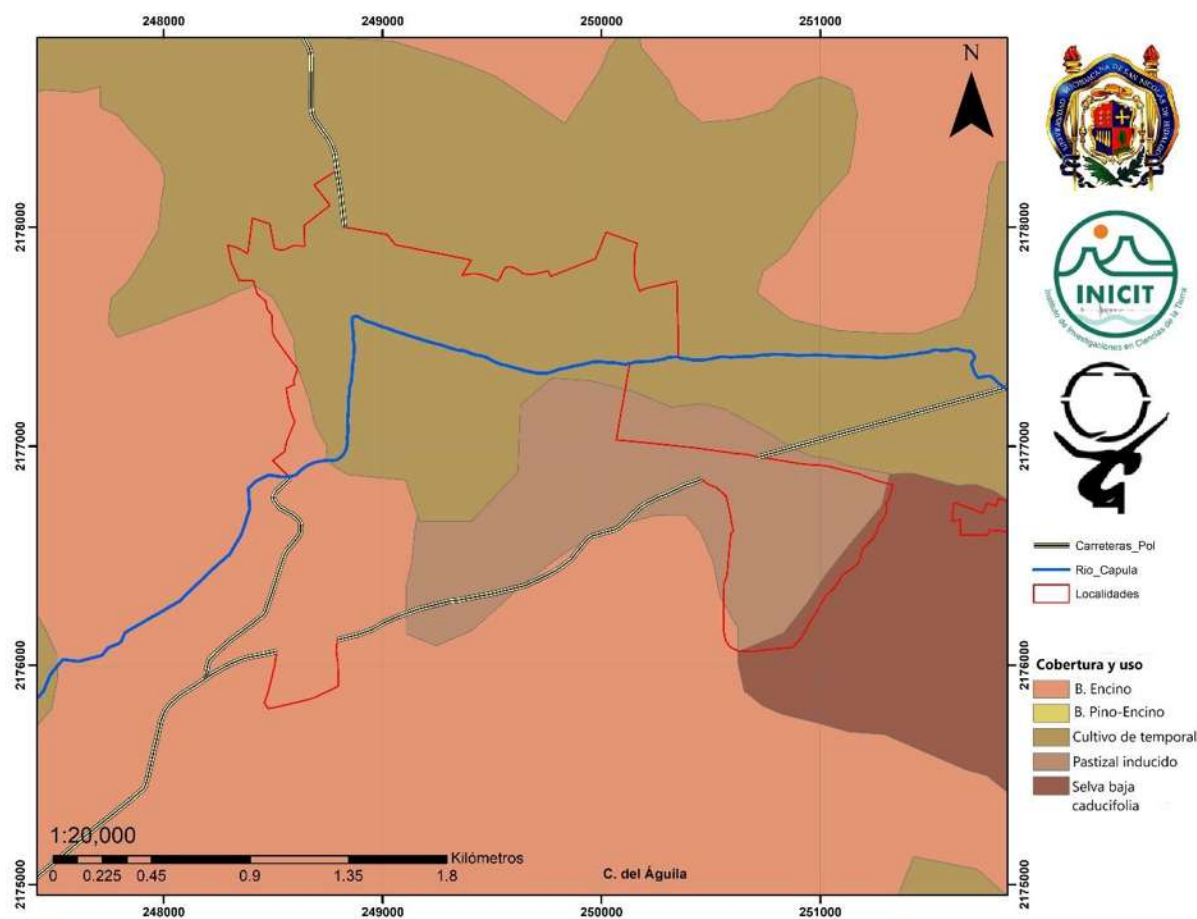


Figura 10. Cobertura y uso de suelo del área de estudio de acuerdo a la carta de Cobertura y uso de suelo.

4. METODOLOGÍA Y ZONAS DE MUESTREO

4. Metodología y zonas de muestreo

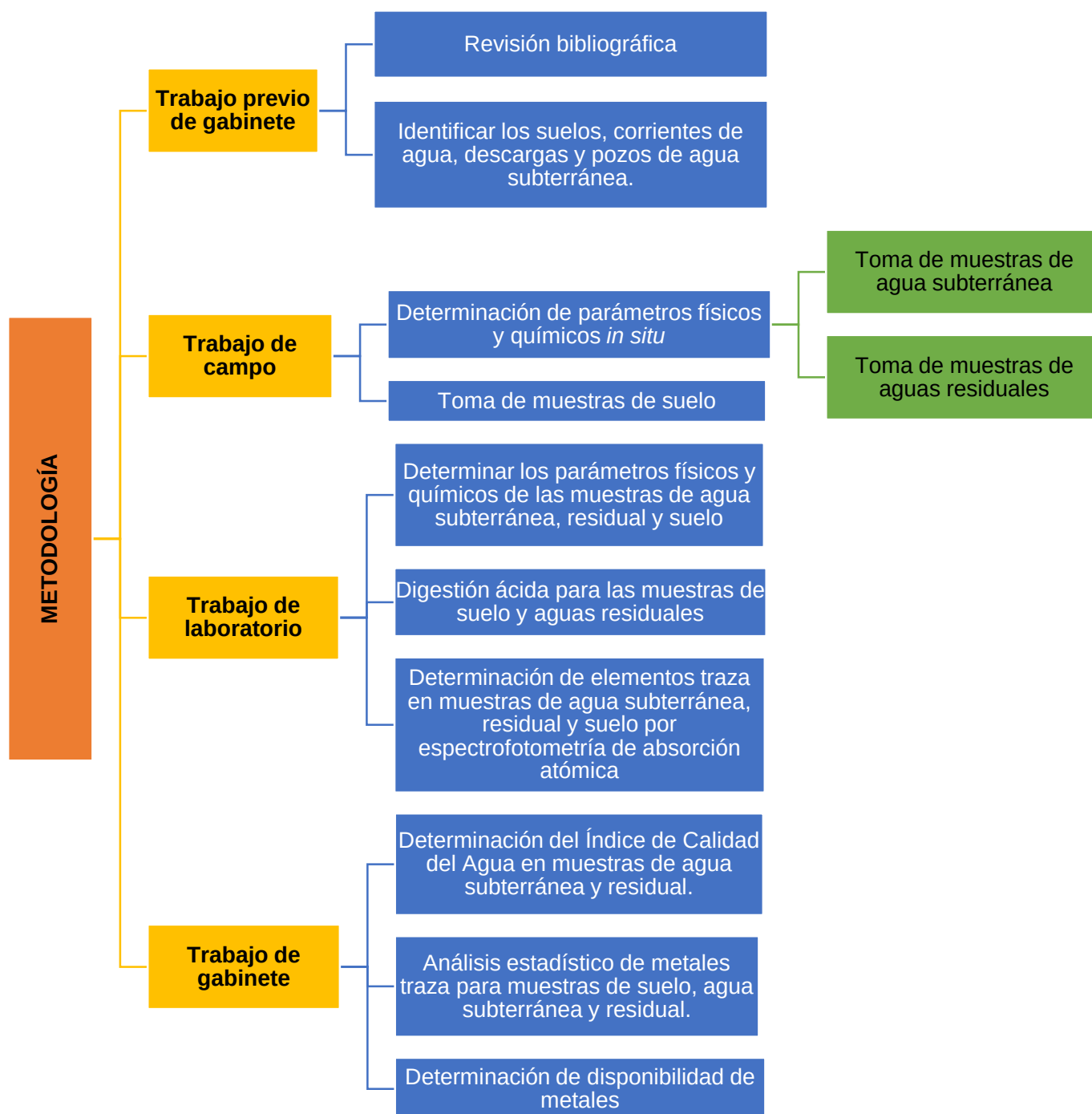


Figura 11. Esquema sintetizado de la metodología que se siguió en el trabajo.

Se realizó una recopilación bibliográfica para conocer los antecedentes del área y zonas aledañas, así como la cartografía pertinente. Posteriormente, fue necesario realizar un recorrido por la zona de estudio para elegir los puntos de muestro más adecuados.

4.1. Zonas de muestreo

El estudio se realizó en la comunidad de Capula, Mich. donde se tomaron las muestras de agua subterránea, de aguas residuales y suelo. Se realizó un recorrido de reconocimiento previo en la zona, con la finalidad de ubicar los pozos de extracción de agua subterránea.

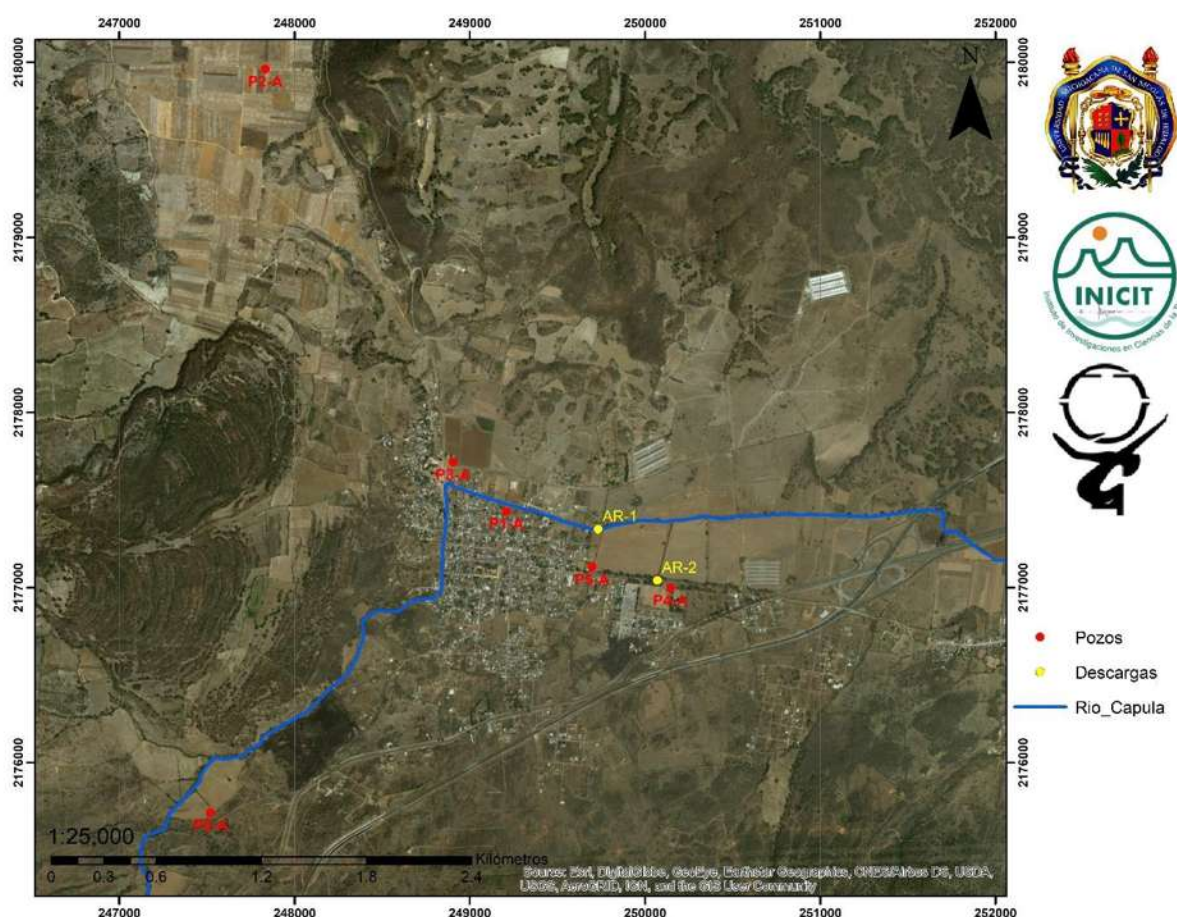


Figura 12. Localización de los pozos de extracción de agua subterránea y descargas de aguas residuales muestreados.

Se identificaron seis pozos de extracción (ver Anexo 1): el pozo Artesano (P1-A) que abastece a la comunidad de Capula, el pozo Campos de cultivo (P2-A) que abastece a la comunidad de Joyitas y San Bernabé, otro es propiedad privada (P3-A), el de la Secundaria abastece a las colonias 2 de Octubre, Barrio del prendimiento, San Francisco y Guadalupe (P4-A), otro abastece a la comunidad de Buenavista (P5-A), y el último a la comunidad de Iratzio (P6-A).

Posteriormente, para el reconocimiento del muestro de las agua residuales, se realizó un segundo recorrido a lo largo del río que atraviesa el poblado, con el objetivo de ubicar las descargas del drenaje más importantes de la zona.

Así fueron ubicadas dos descargas: una principal que corresponde a la mayor parte de la comunidad de Capula (AR-1) y otra más pequeña que corresponde a la colonia 2 de Octubre (AR-2) (ver Anexo 1).

Para las muestras de suelos, se hizo un recorrido dentro de la comunidad, solicitando el acceso a las casas con la finalidad de obtener las muestras de suelo de los patios, consiguiendo de esa manera 30 muestras (ver Anexo 1).



Figura 13. Pozo de extracción de agua subterránea “Los artesanos” (P1-A), que abastece a la comunidad de Capula.



Figura 14. Pozo de extracción de agua subterránea (P2-A), que abastece a las comunidades de Joyitas y San Bernabé.



Figura 15. Pozo de agua privado (P3-A), para uso ganadero y de riego de plantas.



Figura 16. Pozo de extracción de agua subterránea (P4-A), que abastece a las colonias 2 de Octubre, Barrio del prendimiento, San Francisco y Guadalupe.



Figura 17. Pozo de extracción de agua subterránea (P5-A), que abastece a la comunidad de Buenavista.



Figura 18. Pozo de extracción de agua subterránea (P6-A), que abastece a la comunidad de Iratzio.



Figura 19. Descarga principal de aguas residuales de la comunidad de Capula (AR-1).



Figura 20. Descarga de aguas residuales de la colonia 2 de Octubre (AR-2).



Figura 21. Localización de los sitios donde se tomaron las muestras de suelo.

4.2. Toma de muestras

4.2.1. Toma de muestras de agua

4.2.1.1. Parámetros bacteriológicos

La toma de muestras de agua para la determinación de coliformes fecales, se realizó en bolsas estériles desechables Whirl-Pak de 100 mL o en vasos de plástico estériles de 100 mL.

Una vez en la zona de muestreo, debe esterilizarse la llave donde será tomada la muestra de agua para análisis bacteriológicos, con el fin de eliminar cualquier bacteria del ambiente que pudiera estar en el tubo. Para ello, es necesario el uso de guantes y cubrebocas, así como de pinzas para mufla para realizar la esterilización del tubo.



Figura 22. Esterilización del tubo de agua para la toma de muestra.

Es necesario abrir la llave del pozo y dejar correr el agua al menos un minuto, esto es con la finalidad de desechar el agua que se haya conservado durante más tiempo dentro del tubo. Posteriormente, se debe tomar una torunda con cloro y limpiar perfectamente alrededor del tubo, principalmente la parte de adentro (Figura 22). Una vez hecho, se debe secar con una segunda torunda el cloro en exceso.

Consecutivamente, es necesario tomar una segunda torunda con alcohol y limpiar

nuevamente la zona de donde se extraerá la muestra de agua y finalmente con una última torunda con alcohol, se encenderá y se pasará la flama por toda la zona con el fin de esterilizar perfectamente el tubo.

Una vez que se ha realizado la parte de esterilización, debe mantenerse la flama cercana al tubo para seguir conservando estéril el área de trabajo mientras se toma la muestra de agua.

En el sitio de muestreo, debe ser removido el sello y llenar 3/4 del volumen de la bolsa o hasta el aforo de la botella de plástico. Posteriormente debe ser guardada y conservada a 4°C durante su traslado al laboratorio y en un periodo no mayor a 24 horas.

Al final, todas las botellas fueron etiquetadas con los datos de la muestra.

Tabla 4. Toma, preservación y almacenamiento de muestras de agua de acuerdo a las Normas Mexicanas (NMX).

Parámetro	NMX	Cantidad mínima de muestra	Tipo de almacenamiento	Periodo máximo de almacenamiento	Preservación
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2000	100 mL	<i>In situ</i>	< 24 h	No requiere
pH	NMX-AA-008-SCFI-2000	100 mL	<i>In situ</i>	< 2 h	No requiere
C.E.*	NMX-AA-093-SCFI-2000	SIA*	<i>In situ</i>	< 24 h	No requiere
Oxígeno disuelto	NMX-AA-012-SCFI-2001	SIA*	<i>In situ</i>	< 8 h	No requiere
Metales pesados	NMX-AA-051-SCFI-2001	500 mL	Botella de plástico previamente tratada. Mantener a 4°C.	< 6 meses	5 gotas de HNO ₃
Coliformes fecales	NMX-AA-042-1987	100 mL	Bolsas o botellas estériles. Mantener a 4°C.	< 24 h	0.1 cm ³ de solución de tiosulfato de sodio al 1%

*Conductividad Eléctrica. *SIA= Según instrumento a utilizar.

4.2.1.2. Parámetros físicos y químicos y metales pesados

Para los parámetros físicos y químicos y metales pesados, los mejores contenedores son de cuarzo o de teflón aunque se sustituyen por cuestión de costo por envases de plástico. Además, son menos frágiles y tienen mínimos problemas debido al intercambio catiónico. Por el lado negativo, la mayoría de los recipientes de plástico tienen porosidad, por lo que las muestras se evaporan ligeramente durante periodos prolongados de tiempo, por lo cual se deben llenar hasta su aforo.

Las botellas utilizadas deben ser previamente lavadas, introduciéndolas con su tapa en una solución de HNO₃ al 5% durante una semana. Posteriormente debe enjuagarse tres veces con agua desionizada, agitándola con fuerza y desechándola y consecutivamente dejarse secar.



Figura 23. Toma de parámetros físicos y químicos *in situ*.

Una vez en el pozo a muestrear, se deben enjuagar las botellas con agua directa de la llave, agitando y desechándola tres veces. Posteriormente, se realiza la determinación de los parámetros *in situ* (Figura 23) con el Medidor Portátil Multiparamétrico de Calidad del Agua previamente calibrado y se desecha el agua una vez más.

Finalmente, se recolectó 1 litro de agua en una botella de plástico y otros 500 mL de agua, preservándola con ácido nítrico concentrado para la determinación de los parámetros físicos y químicos en laboratorio (Figura 24).

Para la toma de la muestra de agua para la determinación de metales pesados, se recolectaron 100 mL de agua en una botella de plástico llenándola hasta su aforo.

Para la toma de aguas residuales (Figura 25), se utilizó una cubeta de plástico previamente lavada con agua desionizada y se siguió la misma metodología empleada para el caso de las muestras de agua subterránea.



Figura 24. Toma de muestras para la determinación de los parámetros físicos y químicos en laboratorio.



Figura 25. Determinación de los parámetros físicos y químicos *in situ* de aguas residuales.

Posteriormente, deben ser guardadas y conservadas a 4°C durante su traslado al laboratorio. Al final, todas las botellas fueron etiquetadas con los datos de la muestra.

4.2.2. Toma de muestras de suelo

Para el muestreo de los suelos en la comunidad, fue necesario el consentimiento de las autoridades de la Tenencia de Capula.



Figura 26. Toma de muestra de

Para el reconocimiento, descripción y muestreo de los suelos, se realizaron excavaciones superficiales, con una profundidad máxima de 10 cm. Los perfiles fueron descritos bajo los lineamientos recomendados por Siebe *et al.* (1996).

Es necesario limpiar previamente la zona, eliminando las plantas superficiales y la basura o rocas que pudieran interferir con un muestreo adecuado. Se utilizó una pala metálica para poder realizar la excavación y posteriormente se limpió perfectamente con una segunda pala de plástico para tomar 500 g de suelo en una

bolsa ziploc etiquetada con los datos de la muestra (Figura 26), la cual se secó en horno a 105°C durante 48 horas y posteriormente se trituró y tamizó a 2 mm con la malla del No. 10.

4.3. Material y equipo

El equipo utilizado se indica en la Tabla 5.

Tabla 5. Equipo utilizado en la determinación de los parámetros físicos y químicos y concentración de metales.

Parámetro	Equipo
Físicos y químicos de agua (<i>in situ</i>)	Medidor Portátil Multiparamétrico de Calidad del Agua
Físicos y químicos del suelo (laboratorio)	Potenciómetro
Elementos traza	Espectrómetro de Absorción Atómica (PerkinElmer Analyst 2000)

4.4. Análisis de parámetros

4.4.1. Análisis de parámetros físicos y químicos de agua *in situ*.

Los análisis físicos y químicos *in situ* de agua se realizaron una vez que la botella donde se recolectaría la muestra fue previamente enjuagada con agua directa de la llave del pozo. Se midieron con un Medidor Portátil Multiparamétrico de Calidad del Agua.

4.4.2. Análisis de parámetros físicos y químicos de agua en laboratorio

La determinación de los parámetros físicos y químicos del agua se llevó a cabo en el laboratorio certificado de CONAGUA, con base a las siguientes Normas Mexicanas:

Tabla 6. Normas Oficiales Mexicanas utilizadas en la determinación de los parámetros físicos y químicos del agua subterránea y residual muestreada.

Parámetro	Norma Oficial Mexicana
Conductividad Electrolítica	NMX-AA-093-SCFI-2000 (DOF, 2000a)

pH	NMX-AA-008-SCFI-2016 (DOF, 2016)
Oxígeno disuelto	NMX-AA-012-SCFI-2001 (DOF, 2001b)
Color	NMX-AA-045-SCFI-2001 (DOF, 2000c)
Dureza total	NMX-AA-072-SCFI-2001 (DOF, 2001d)
Cloruros	NMX-AA-073-SCFI-2001 (DOF, 2000e)
Sulfatos	NMX-AA-074-SCFI-2014 (DOF, 2014)
Nitratos	NMX-AA-079-SCFI-2001 (DOF, 2001f)
DBO ₅	NMX-AA-028-SCFI-2001 (DOF, 2001g)

4.4.3. Análisis de parámetros físicos y químicos en suelos

Con la excepción de la humedad inicial del suelo, las muestras fueron secadas en horno a 105°C, posteriormente fueron trituradas y tamizadas utilizando el tamiz de 2 mm, eliminando la cantidad de piedras que se presentaron.

En laboratorio, de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-021-RECNAT-2000 (DOF, 200 b) se determinaron los siguientes parámetros: humedad inicial del suelo por el método gravimétrico; textura por el método de Bouyoucus y la clase textural mediante el programa Soil Water Characteristics V 6.1.51 (Saxton *et al.*, 1986); pH en agua y conductividad eléctrica relación suelo agua 1:2.5 medido en potenciómetro y conductímetro, respectivamente.

4.4.4. Análisis de metales pesados en aguas residuales y suelos

Los metales se determinaron de acuerdo al Manual de Métodos Estandarizados por Espectrometría de Absorción Atómica (AAS por sus siglas en inglés). La determinación de metales pesados en suelos y sedimentos es posible con una digestión previa de las muestras.

4.4.4.1. Digestión ácida de aguas residuales



Figura 27. 100 mL de agua residual en probeta.



Figura 28. Trasvasar el agua de la probeta a un vaso de precipitados.

Se realizó la digestión de muestras mediante el Método 3005 A de la United States Environmental Protection Agency (US EPA) para el tratamiento de muestras de agua para su análisis mediante absorción atómica.

Se debe homogenizar la muestra de agua residual y tomar una alícuota de 100 mL (Figura 27) para

posteriormente trasvasarlo a un vaso de precipitados (Figura 28).



Figura 29 Se toman 5 mL de ácido nítrico y 5 mL de ácido clorhídrico.



Fi. 30 Se coloca el ácido nítrico lentamente sobre la muestra de agua residual.

Posteriormente, se deben agregar 5 mL de ácido nítrico (HNO_3) y 5 mL de ácido clorhídrico (HCl) concentrados (Figura 29 y 30), tapados con un vidrio de reloj y colocados en una placa de calentamiento a $90 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta reducir a reflujo el volumen casi a sequedad (~ 10 mL).



Figura 31. Se coloca sobre una plancha hasta obtener 10 mL.



Figura 32. Se filtran los 10 mL hasta su aforo.

Es importante mantener vigiladas las muestras para evitar que hiervan, debido a que podrían provocar salpicaduras de los ácidos y causar accidentes (Figura 31). Una vez que se ha llegado al volumen deseado, la muestra se dejará enfriar y posteriormente será filtrada con papel filtro Whatman no.

40 y aforada a 100 mL con agua desionizada (Figura 32) para finalmente refrigerar.

4.4.4.2. Digestión ácida para muestras de suelo

La Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (DOF, 2004) establece los criterios para determinar las concentraciones de metales en suelo a través de absorción atómica.



Figura 33. Se coloca la muestra de suelo en un vaso de precipitados y se tapa.

Se debe pesar 1 gramo de muestra de suelo previamente seca, triturada, tamizada y homogenizada con una espátula de plástico para colocarla en un vaso de precipitados de 250 mL o dentro de un matraz Erlenmeyer de 250 mL (Figura 33).

Posteriormente, se deben adicionar 10 mL de una solución de ácido nítrico 1:1 deslizándolo lentamente por las paredes del vaso de precipitados, mezclando suavemente (Figura 34). Se cubrirá con un vidrio de reloj

se colocará sobre una parrilla de calentamiento a $95 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 10 a 15 minutos, evitando la ebullición de la muestra y posteriormente se dejará enfriar a temperatura ambiente.



Figura 34. Se desliza suavemente por las paredes.



Figura 35. Humos cafés.



Figura 36. Se coloca sobre una plancha hasta obtener 5 mL.



Figura 37. Se adiciona 2 mL de agua destilada y 3 mL de peróxido.

Una vez que se ha enfriado, se adicionarán 5 mL de ácido nítrico concentrado y se pone sobre la parrilla a reflujo durante 30 minutos. Si se generan humos cafés (Figura 35), se seguirán adicionando 5 mL de ácido nítrico hasta que no se generen más humos, indicando que la reacción ha sido completa.

Evaporar calentando a $95 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta casi 5 mL de solución (Figura 36) durante dos horas, manteniendo siempre el volumen de solución en el fondo del vaso (no secar a totalidad). Dejar enfriar cuando se haya completado el tiempo dispuesto para la reacción.

Adicionar 2 mL de agua destilada y 3 mL de peróxido de hidrógeno al 30% (Figura 37), teniendo la precaución de que no ocurran derrames de la muestra por la reacción del peróxido. Calentar suavemente hasta que termine la efervescencia (Figura 38).

Cuando la reacción termine y el recipiente se encuentre frío, adicionar 1 mL de peróxido de hidrógeno al 30%. Siga adicionando alícuotas de 1 mL hasta que no ocurra más efervescencia (Figura 39). No adicionar más de 10 mL de peróxido.



Figura 38. Reacción efervescente por el peróxido.



Figura 39. Se deja enfriar hasta que termine la reacción.



Figura 40. Se filtran los 5 mL hasta su aforo.

Una vez que el peróxido ha dejado de reaccionar, la muestra se dejará enfriar y posteriormente será filtrada con papel filtro Whatman No. 40 y aforada a 100 mL (Figura 40) con agua desionizada para finalmente refrigerar.

4.4.4.3. Determinación de metales pesados (MP) y Arsénico

Los metales pesados (Fe, Zn y Cu) y el metaloide As en agua subterránea, aguas residuales y suelos se identificaron y cuantificaron mediante la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS) a partir de las muestras previamente digeridas, a excepción de las aguas de pozos de extracción que se analizaron de manera directa de acuerdo a la NMX-AA-051-SCFI-2001 (DOF, 2001 a).

La determinación de las concentraciones de metales pesados se realizó mediante un espectrofotómetro Perkin Almerm Analyst 2000. El arsénico se obtuvo con la técnica de AAS a partir de la generación de hidruros (DOF, 2000b).

Los límites permisibles de metales pesados y arsénico en aguas naturales de acuerdo a las normas mexicanas, se muestran en la Tabla 7:

Tabla 7. Concentraciones máximas permitidas en el agua según su uso de acuerdo a las normas mexicanas.

Elemento	NOM 127-SSA1-1994	NOM 001 SEMARNAT 1996		NOM 001 ECOL 1996	OMS*	NOM-159-SEMARNAT-2011
	Uso					
	Público urbano	Público urbano	Riego agrícola	Público urbano	Potable	Suelo
	mg/L					mg/kg
As	0.05	0.2	0.4	0.1	0.01	100
Cu	2.00	6.0	6.0	4.0	3.0	1000
Zn	5.00	10.0	10.0	20.0	15.0	1000
Fe	0.30	-	-	-	0.3	-

4.5. Análisis estadístico

El estudiar y conocer las posibles relaciones existentes entre los distintos parámetros de calidad de las aguas y suelos establecidos según las Normas Oficiales Mexicanas, así como la relación entre dichos parámetros y su clasificación es parte de los objetivos de la presente tesis, por tal motivo se recurre al uso de las herramientas estadísticas, en particular el análisis multivariado. El análisis estadístico multivariado permite la clasificación de las variables analizadas de una manera cuantitativa y cualitativa que da como resultado el agrupamiento de las muestras y la evaluación de la posible existencia de correlaciones entre los parámetros estudiados (Cloutier *et al.*, 2008 en Martínez-Trejo, 2017).

El análisis estadístico multivariado más utilizado es el análisis de componentes principales, el cual se define como una transformación lineal ortogonal que convierte las variables a un nuevo sistema de coordenadas para el conjunto original de datos en el cual la varianza de mayor tamaño, dada por cualquier proyección de las variables, es situada en la primera coordenada (primer componente principal), la segunda varianza más grande en la segunda coordenada, y así sucesivamente

(Subyani y Al-Ahmadi, 2009). Es una técnica estadística de síntesis de la información o reducción de la dimensión (número de variables). Es decir, ante un banco de datos con muchas variables, el objetivo será reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información posible (Martínez-Trejo, 2017).

La elección de los factores se realiza de tal forma que el primero recoja la mayor proporción posible de la variabilidad original; el segundo factor debe recoger la máxima variabilidad posible no recogida por el primero y así sucesivamente. Del total de factores, se elegirán aquéllos que recojan el porcentaje de variabilidad que se considere suficiente, a éstos se les denomina componentes principales.

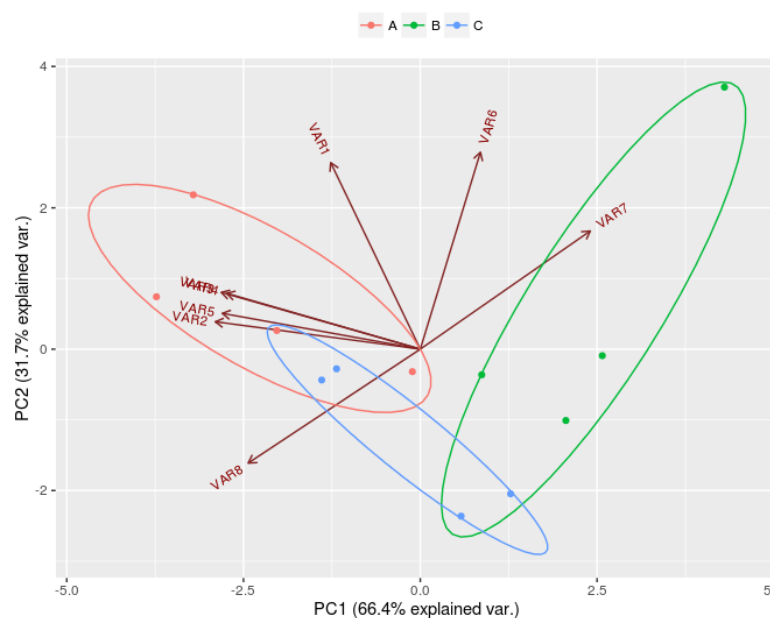


Figura 41. Ejemplo de diagrama de componentes principales.

El tipo de muestreo que se lleva a cabo realizando medidas de diferentes parámetros mediante diversas técnicas, proporciona una información diferente pero con una relación existente entre diferentes parámetros, lo cual permite comprobar que los valores recogidos durante el muestreo son lógicos. Por ejemplo, si la medida de conductividad eléctrica da valores elevados, las concentraciones de compuestos que aumenten la conductividad eléctrica también deberán ser elevadas. Por tanto,

el análisis clúster o de conglomerados permite establecer medidas de semejanza y de distancia entre los objetos a clasificar en función del tipo de datos analizado. El Análisis Clúster, es una técnica estadística multivariante cuya finalidad es dividir un conjunto de objetos en grupos (clúster en inglés) de forma que los perfiles de los objetos en un mismo grupo sean muy similares entre sí (cohesión interna del grupo) y los de los objetos de clústers diferentes sean distintos (aislamiento externo del grupo).

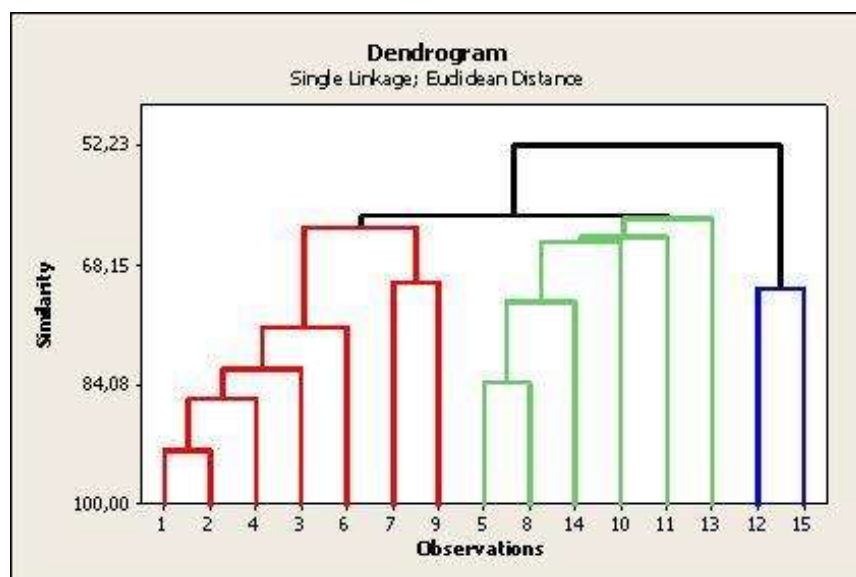


Figura 42. Ejemplo de un dendrograma (análisis clúster o de conglomerados).

El paso final es la interpretación de los análisis estadísticos, la interpretación geoquímica de los factores determinados proporciona un amplio panorama de los procesos dominantes que pueden controlar la distribución de las variables hidrogeoquímicas en el área de estudio (Martínez-Trejo, 2017), las cuales pueden ser representadas de manera gráfica con un mapa de la zona evidenciando las variables analizadas.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5. Resultados y Discusión

5.1. Parámetros físicos y químicos del agua

Se analizaron las propiedades fisicoquímicas de las muestras de los pozos de agua subterránea y las descargas en la comunidad de Capula, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 8. Resultados físicos y químicos de las muestras de agua subterránea y residual.

	Pozo Artesanos	Pozo Campos cultivo	Pozo Superficial	Pozo Secundaria	Pozo Buenavista	Pozo Irtazio	Descarga Capula	Descarga Estancada
T° Ambiente (°C)	15.0	18.0	21.0	13.0	18.0	17.0	20.0	20.0
T° Agua (°C)	18.6	18.9	18.8	21.2	20.2	18.6	19.6	19.1
C.E.* (μS/cm)	374	255	301	250	355	197	2610	2710
pH	7.31	7.45	6.40	7.86	7.82	7.62	7.13	7.27
O.D.* (mg/L)	3.04	2.16	3.6	1.88	1.8	2.02	1.84	1.98
Color	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	10.0	350	250
Dureza Total (mg/L)	121.8	84.0	113.4	93.5	140.7	74.0	943.6	942.8
Cloruros (mg/L)	20.99	14.49	17.49	12.49	23.49	12.99	149.95	159.45
Sulfatos (mg/L)	30.29	20.27	25.50	19.32	32.16	18.85	242.45	251.47
Nitratos (mg/L)	0.172	0.228	0.178	0.210	0.186	0.188	0.518	0.572
DBO ₅ * (mg/L)	1.88	2.21	0.95	1.56	1.43	1.40	572.00	578.00

*C.E.: Conductividad Eléctrica; *O.D.: Oxígeno Disuelto; *DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno.

La composición fisicoquímica natural del agua es propensa a modificarse por las actividades humanas (como la agricultura, ganadería, industria, vivienda, etc.). Un análisis del agua nos ayuda a determinar la alteración de la misma y brindarnos intervalos o parámetros de seguridad (parámetros de control) que nos permiten clasificar el agua dependiendo el uso que se le dé.

5.1.1. Temperatura

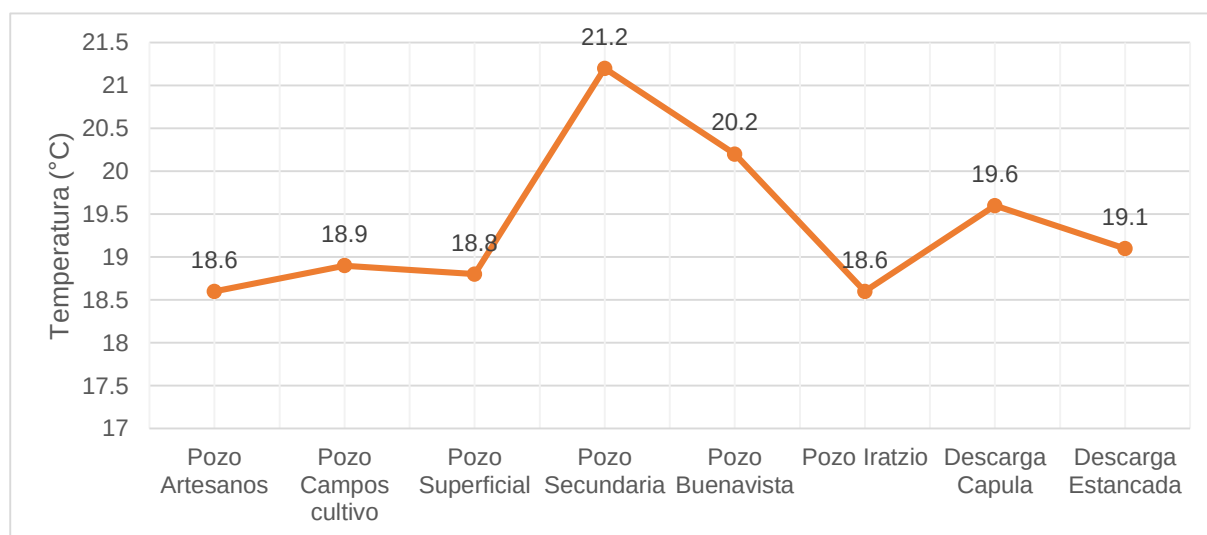


Figura 43. Temperatura de las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.

La temperatura de las muestras de agua subterránea varió de 18.6°C, siendo ésta la más baja correspondiente a los pozos Artesanos e Iratzio, hasta los 21.2°C que corresponde al pozo Secundaria. Para el agua potable no existe un límite permisible, sin embargo, con base en la temperatura, se definen los usos de la misma, siendo las de temperaturas más altas, las utilizadas con fines domésticos y lugares recreativos (Paéz, 2008). Las temperaturas fueron aumentando conforme la hora en la que se realizó la toma de muestras, pues la temperatura ambiente también aumentaba.

Los parámetros de control dan la posibilidad de clasificar cada propiedad fisicoquímica específica del agua para su estudio. Tomando como base dichos parámetros, se realizó el análisis de agua correlacionando el valor de la propiedad obtenida con los valores de los parámetros de control.

5.1.2. Conductividad eléctrica

Tabla 9. Valores de conductividad eléctrica de acuerdo a los diferentes tipos de agua (Orozco, 2003).

Conductividad Electrolítica	$\mu\text{S/cm}$
Agua pura	0.05
Agua desmineralizada	0.1 – 1
Agua destilada	0.1 – 10
Agua del grifo	100 – 1000
Agua contaminada	1000 – 10000
Agua de mar	30000 – 50000

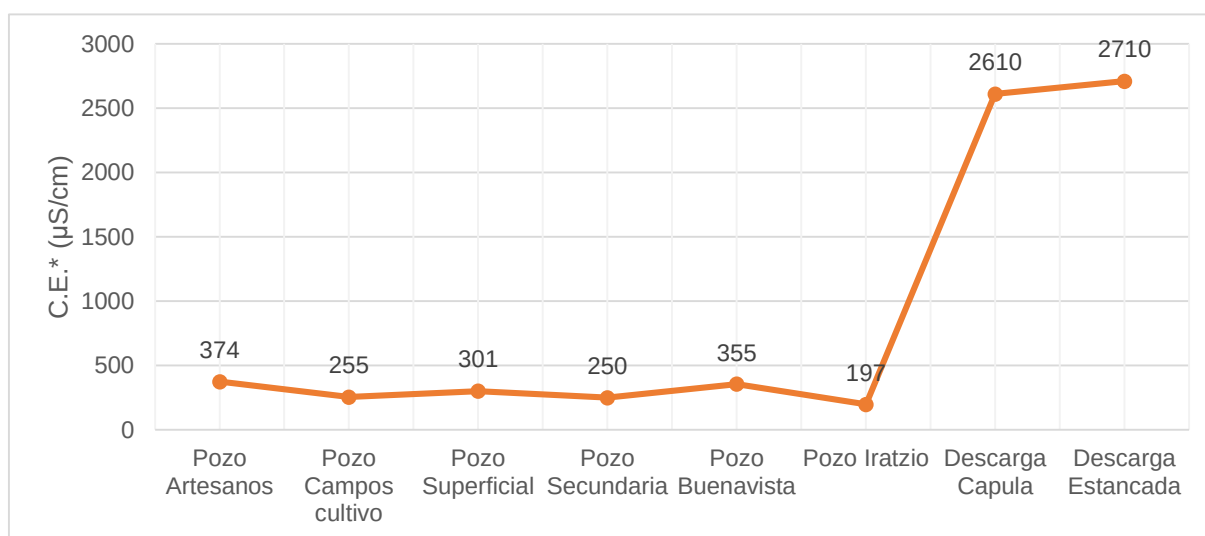


Figura 44. Conductividad eléctrica de las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.

De acuerdo a la clasificación de la conductividad eléctrica de la Tabla 9, los valores obtenidos en los pozos de extracción de agua subterránea, entran en el tipo de “agua de grifo”, es decir, es agua corriente apta para el consumo humano. En cambio, el agua de las descargas, obtienen valores altos y se clasifica como “agua contaminada”, lo cual es un resultado lógico y esperado para las mismas.

5.1.3. pH

Tabla 10. Valores de pH de acuerdo a los diferentes tipos de agua (APHA; AWWA; WPCF, 1992).

pH	U
Aguas residuales	<6.2 y > 9
Agua para consumo humano	6.5 - 8.5

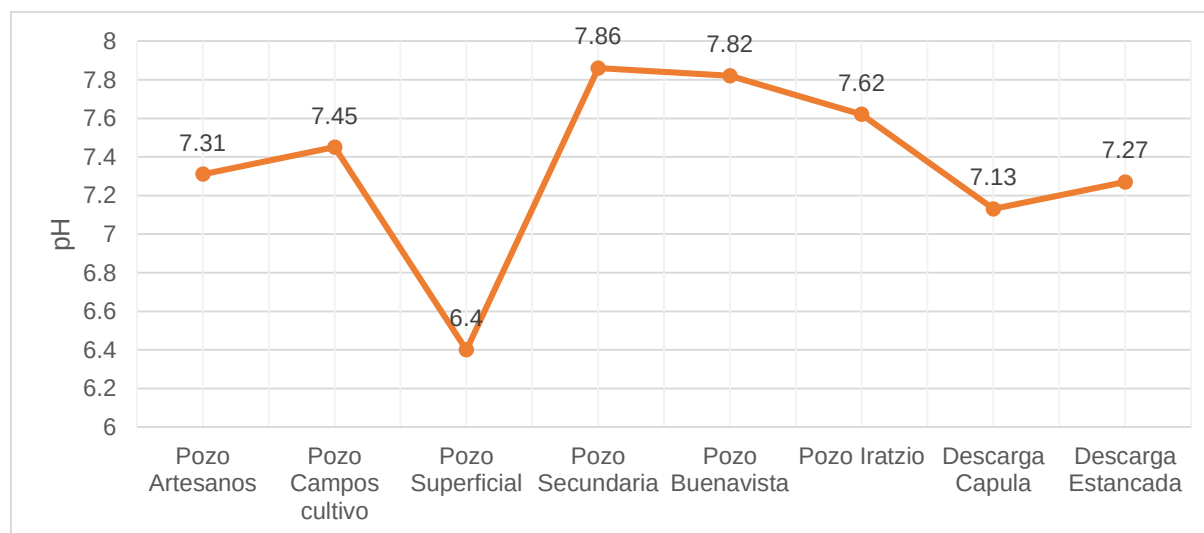


Figura 45. pH de las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.

Con base en la clasificación anterior (Tabla 10), los pH obtenidos en las muestras de agua, nos indican que las muestras de agua subterránea y las aguas residuales, son aptas para consumo humano.

5.1.4. Oxígeno Disuelto (OD)

Tabla 11. Clasificación de las aguas de acuerdo a la concentración de Oxígeno Disuelto (Orozco, 2003).

Oxígeno Disuelto	mg/L
Anoxia	0
Hipoxia	0 – 5
Aceptable	5 – 8
Buena	8 - 12
Sobresaturada	> 12

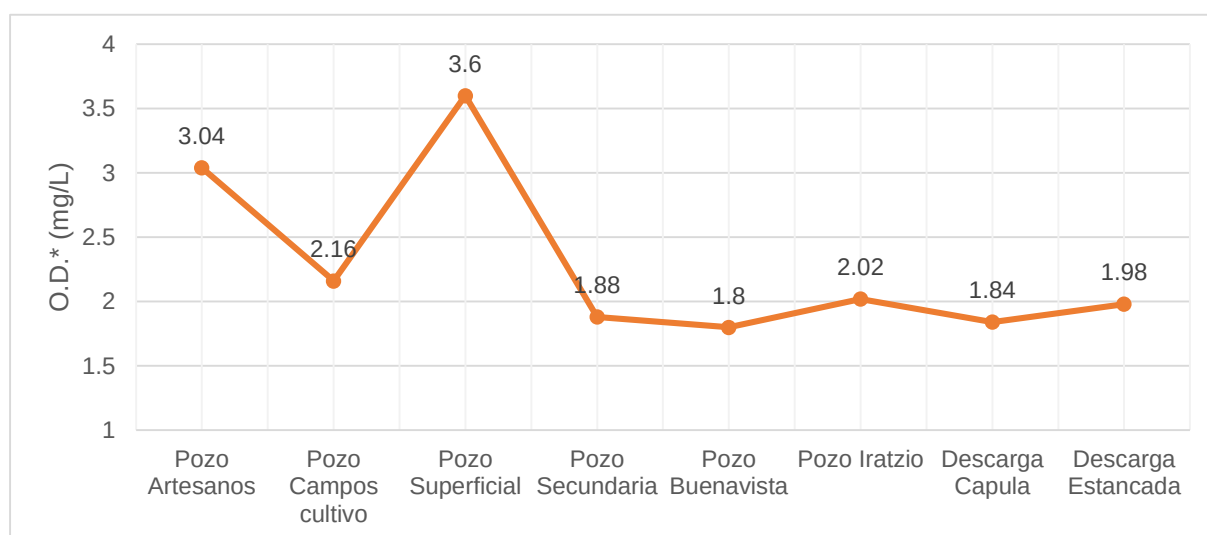


Figura 46. Oxígeno disuelto en las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.

La Tabla 11, nos indica que las muestras de pozos de extracción de agua subterránea, presentan baja concentración de oxígeno, clasificándolas como hipóxicas, lo cual es acorde si consideramos que son aguas subterráneas y no tienen intercambio de gases con la atmósfera, además de que los procesos fotosintéticos y de respiración deben ser prácticamente nulos.

Por otro lado, los desagües aumentan el movimiento de nitratos, sulfatos y nutrientes con el agua, produciendo un alza en la producción bacteriana lo que provoca que se consuma más oxígeno y por ende se obtengan niveles de hipoxia en las aguas residuales. Esta actividad bacteriana se confirma con los valores altos de DBO₅ para las aguas residuales.

5.1.5. Dureza total

Tabla 12. Clasificación de las aguas de acuerdo a la dureza total (Orozco, 2003).

Dureza Total	mg/L
Blanda	0 – 75
Semidura	75 – 200
Dura	200 – 300
Muy Dura	> 300

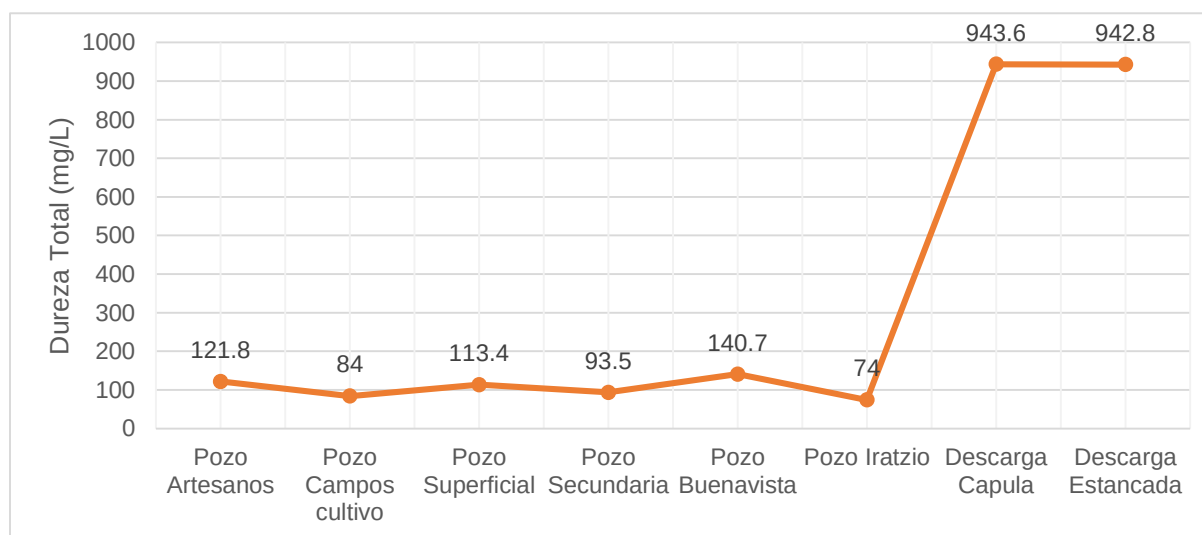


Figura 47. Dureza total de las muestras de agua subterránea y residual de Capula, Mich.

De acuerdo a la Tabla 12, las muestras de pozo de extracción de agua subterránea, se clasifican como “aguas semiduras” y las aguas residuales como “aguas muy duras”, lo cual indica que existe la presencia de más iones disueltos.

5.1.6. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno nos determina la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para degradar la materia orgánica presente en el líquido.

Tabla 13. Clasificación de las aguas de acuerdo a la concentración de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (APHA; AWWA; WPCF, 1992).

DBO ₅	mg/L
Potable	0.75 – 1.5
Poco contaminada	5 – 50
Descarga municipal	100 – 400
Industrial	500 – 10000

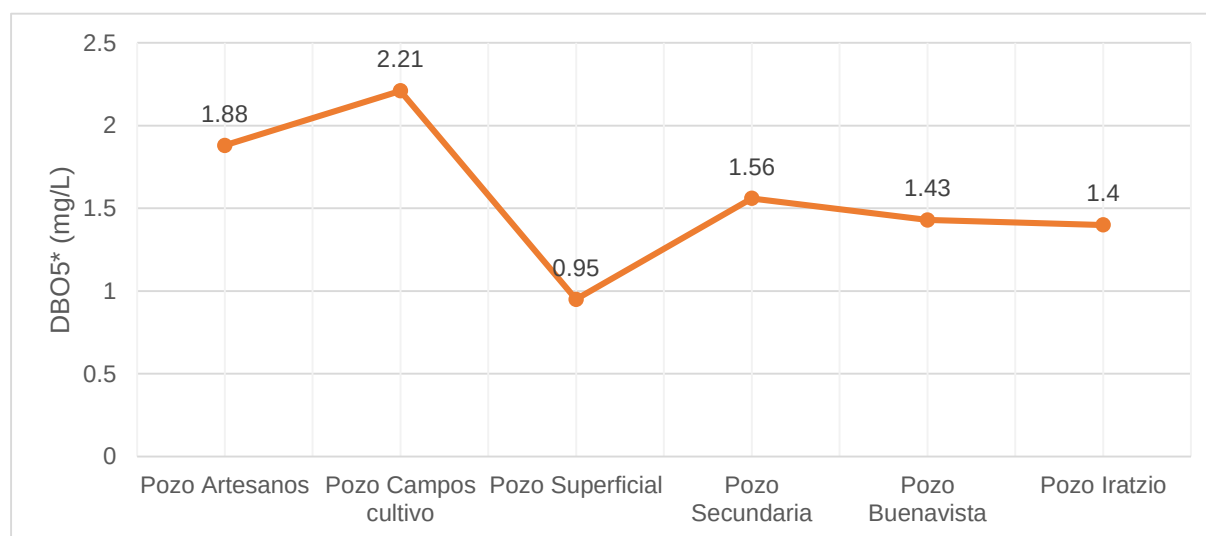


Figura 48. Demanda Bioquímica de Oxígeno de las muestras de agua subterránea de la comunidad de Capula, Mich.

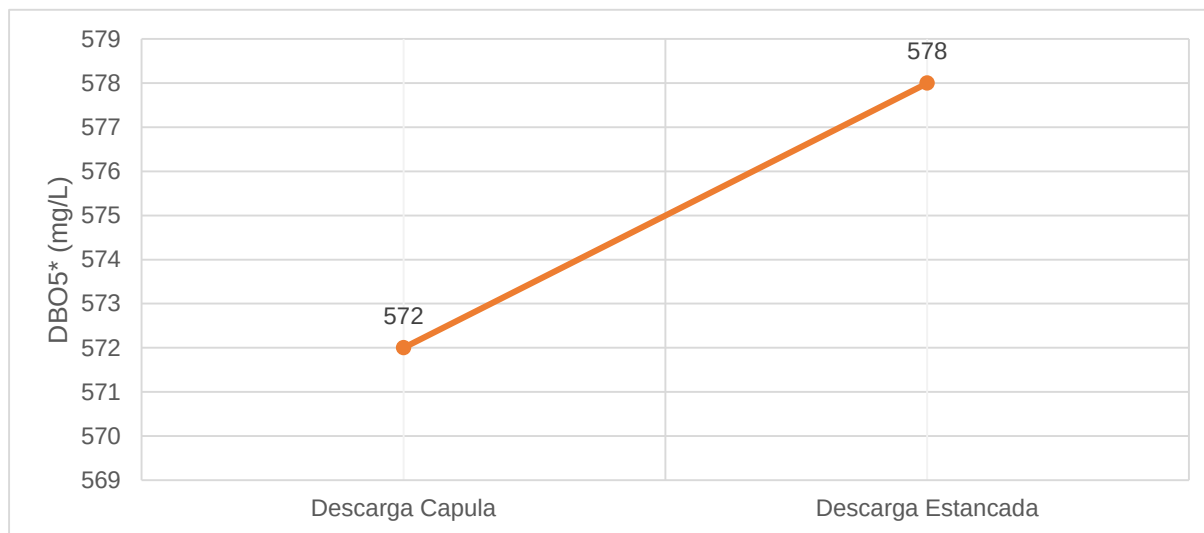


Figura 49. Demanda Bioquímica de Oxígeno de las muestras de agua residual de la comunidad de Capula, Mich.

Los valores bajos de DBO_5 sugieren una baja presencia de microorganismos, mientras que un valor alto indica que puede haber, ya sea una gran cantidad de microorganismos o una gran cantidad de materia orgánica, siendo un valor alto de DBO_5 un indicador de contaminación.

Los pozos de extracción de agua subterránea presentan valores que la clasifican como “agua potable”, mientras que el agua obtenida de las descargas está clasificada como agua del tipo industrial (contaminada).

5.1.7. Concentración de Cloruros, Sulfatos y Nitratos

Tabla 14. Límites máximos permitidos para Cl, S, y N (SEMARNAT, 2005).

Propiedad	Límite máximo permitido para consumo humano (mg/L)
Cloruros	250
Sulfatos	250
Nitratos	≤5

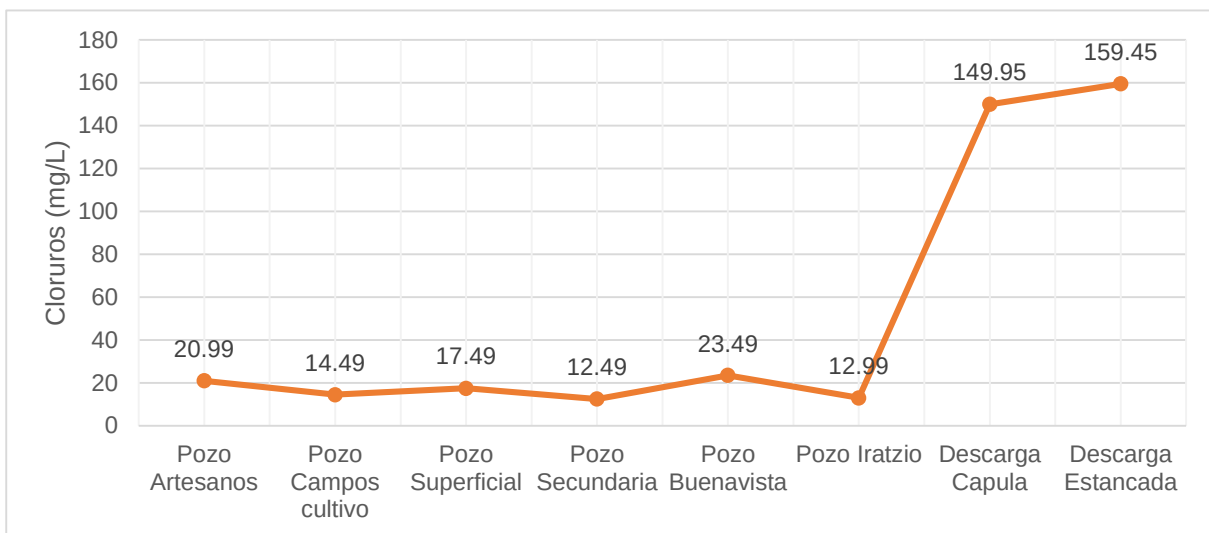


Figura 50. Cloruros de las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.

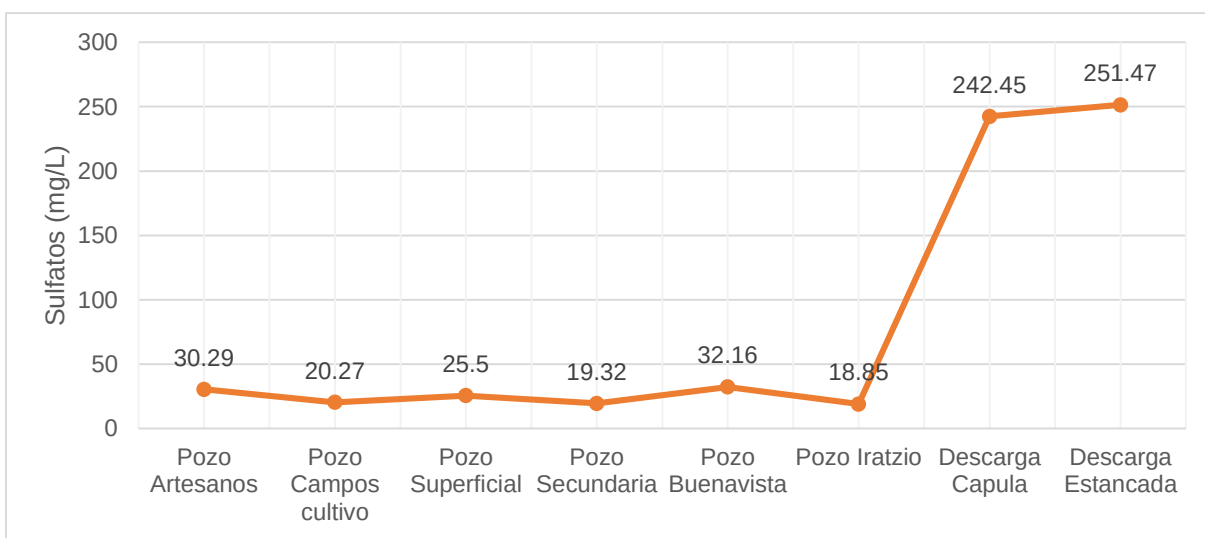


Figura 51. Sulfatos de las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.

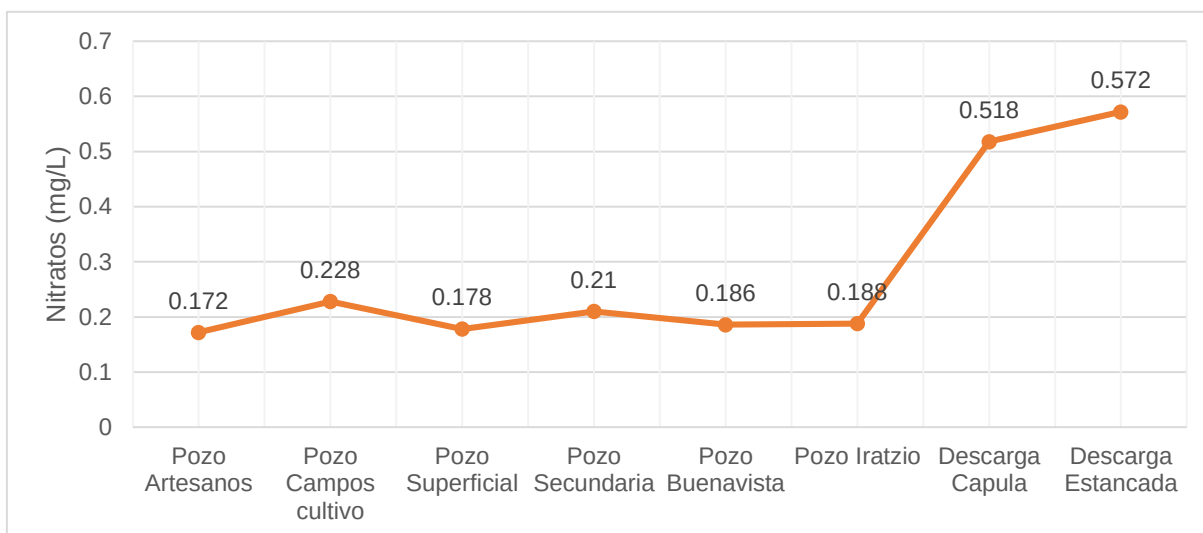


Figura 52. Nitratos de las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.

El análisis de químicos (cloruros, sulfatos y nitratos) nos arroja que los valores, tanto de las muestras de pozo de extracción de agua subterránea y las aguas residuales, están dentro de los límites permisibles.

Si se analiza cada parámetro comparándolo con las Tablas podemos inferir que las aguas de estos pozos no están contaminadas o, en su defecto, están muy poco contaminadas. En muchos casos, este tipo de análisis solo nos permite clasificar que tipo de agua es, pero no nos brinda mayor información sobre la calidad de ésta y sus recomendaciones para uso humano o cualquier otro uso. Por esta razón se decidió calcular el Índice de Calidad del Agua (ICA).

5.2. Índice de Calidad del Agua (ICA)

El ICA es un índice multiparamétrico que se basa en los estudios de la National Sanitation Foundation y de los estudios de Ball y Church (1980), el cual se consiste

en determinar los parámetros más indicativos y variables de contaminación del agua, a los cuales se les asigna un peso o una ponderación.

A continuación se presentan las variables usadas para el cálculo del ICA y su peso de acuerdo a Ball y Church (1980).

Tabla 15. Parámetros físicos y químicos y su ponderación.

Parámetro	W_i
Conductividad Electrolítica	2
pH	1
Oxígeno Disuelto	5
Dureza Total	2
Cloruros	0.5
Sulfatos	2
Nitratos	2
Demanda Bioquímica de Oxígeno	5

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Se calculó el ICA utilizando la siguiente fórmula de acuerdo a SEMARNAT (1999) donde:

El numerador es la suma de cada subíndice o de cada parámetro (por lo que i indica cada parámetro y $n = 8$) multiplicado por su peso.

El denominador es la suma de todos los pesos de los parámetros usados.

Las fórmulas de cálculo propuestas por distintos investigadores para la determinación de cada uno de los subíndices se indican a continuación:

Tabla 16. Fórmulas utilizadas para la determinación de los índices y su autor.

Indicador	Autor	Fórmula	
C.E.	Stoner (1978)	Si la C.E. es <700 Si la C.E. es =>700	ICE= 100-0.0002*CE ² ICE= 2
pH	SEMARNAT (1999)	Si el pH es menor a 6.7 Si el pH esta entre 6.7 y 7.3 Si el pH es mayor a 7.3	IpH= 10 ^{0.2335+0.44} IpH= 100 IpH= 10 ^{4.22-0.293}
O.D.	Cude (2001)	Si el O.D. es menor a 3.3 Si O.D. está entre 3.3 y 10.5 Si el O.D. es mayor a 10.5	IDO= 10 IDO= 80.28954+31.88249*OD-1.400999*OD ²
Dureza	Dinius (1972)	ID= 10 ^(1.974-0.001332)	
Cloruros	Prati (1971)	0 ≤ Cl < 50 50 ≤ Cl < 300 300 ≤ Cl	ICI= 0.000228*Cl ² + 0.0314*Cl ICI= 0.000132*Cl ² + 0.0074*Cl + 0.6 ICI= 3.75*(0.02*Cl-5.2)*5.2
Sulfatos	Nasirian (2005)	Si S menor a 1000 Si S mayor a 1000	IS= - 0.1*S+100 IS= 0
Nitratos	Nasirian (2005)	si N es menor a 3 mg/L si N es mayor a 3 mg/L	IN= 100 ^{(N*(-0.460512))} IN= 10
DBO ₅	SEMARNAT (1999)	IDBO ₅ = 120 (DBO) ^{-0.673}	

Una vez obtenidos los subíndices de cada parámetro, se aplicó la fórmula indicada, obteniendo los resultados siguientes:

Tabla 17. Tabla de resultados del Índice de Calidad del Agua.

Parámetros	Pozo Artesano	Pozo Campos cultivo	Pozo Superficial	Pozo Secundaria	Pozo Buenavista	Pozo Iratzio	Descarga Capula	Descarga Estancada
<i>i</i> pH	100.000	108.931	85.981	82.608	84.867	97.127	100.000	100.000
<i>i</i> DBO	78.464	70.373	124.215	88.963	94.328	95.684	1.673	1.661
<i>i</i> OD	10.000	10.000	16.330	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
<i>i</i> N	0.694	0.617	0.686	0.641	0.674	0.671	0.333	0.297
<i>i</i> DT	65.047	72.966	66.729	70.889	61.415	75.218	5.351	5.364
<i>i</i> CE	72.025	86.995	81.880	87.500	74.795	92.238	2.000	2.000
<i>i</i> S	96.971	97.973	97.450	98.068	96.784	98.115	75.755	74.853
<i>i</i> Cl	0.760	0.503	0.619	0.428	0.863	0.446	4.678	5.136
$\sum i * W$	1011.796	1027.896	1282.195	1091.617	1073.843	1158.029	325.243	323.335
ICA	51.887	52.713	65.754	55.980	55.069	59.386	16.679	16.581

El resultado final es interpretado de acuerdo con la siguiente escala de clasificación, en la que el fondo representa el color correspondiente a cada rango.

Tabla 18. Tabla de clasificación del ICA de acuerdo al criterio general.

ICA	Criterio General
85 – 100	No Contaminado
70 – 84	Aceptable
50 – 69	Poco Contaminado
30 – 49	Contaminado
0 – 29	Altamente Contaminado

El ICA nos indica que el agua obtenida de los pozos de extracción de agua subterránea de la comunidad de Capula está poco contaminada, a diferencia del análisis por parámetros de control, el cual indicaba que el agua de los pozos no estaba contaminada ya que entraban en los intervalos de control.

Estos parámetros son muy generales y nos da un valor sesgado sobre la calidad del agua, en cambio el ICA nos indica puntualmente si existe contaminación y en qué grado.

Para las aguas residuales, el ICA nos indica que el agua obtenida está altamente contaminada y que rebasa los parámetros de confiabilidad.

Se realizó el análisis ampliado del ICA utilizando la Tabla comparativa de la CONAGUA, con la cual se puede ampliar el valor obtenido por el ICA con su recomendación correspondiente.

Tabla 19. Tabla comparativa entre los diferentes usos del agua de acuerdo al ICA (CONAGUA, 2005)

ICA	Criterio general	Abastecimiento público	Recreación	Pesca y vida acuática	Industrial y agrícola	
100	No contaminado	No requiere purificación	Aceptable para cualquier deporte acuático	Aceptable para todos los organismos	No requiere purificación	
90		Ligera purificación			Ligera purificación para algunos procesos	
80	Aceptable	Mayor necesidad de tratamiento			Aceptable pero no recomendable	Aceptable, excepto especies muy sensibles
70	Poco contaminado		Dudoso para especies sensibles			
60						
50	Contaminado	Dudoso	Dudoso para contacto directo	Solo organismos muy resistentes	Tratamiento en la mayor parte de la industria	
40		No aceptable	Sin contacto con el agua			
30	Señal de contaminación		No aceptable	No aceptable	Uso muy restringido	
20	No aceptable					
10						

De acuerdo a la Tabla anterior, las recomendaciones de CONAGUA para las aguas de la comunidad de Capula de acuerdo al ICA son las siguientes:

Tabla 20. Recomendaciones para las muestras de agua subterránea y residual de Capula, Mich.

Muestra	ICA	Recomendación
Pozo Artesano	51.8	Necesita Tratamiento
Pozo Campos cultivo	52.7	Necesita Tratamiento
Pozo Superficial	65.7	Necesita Tratamiento
Pozo Secundaria	55.9	Necesita Tratamiento
Pozo Buenavista	55.0	Necesita Tratamiento
Pozo Iratzio	59.3	Necesita Tratamiento

Descarga Capula	16.6	No es aceptable para ningún tipo de uso
Descarga Estancada	16.5	No es aceptable para ningún tipo de uso

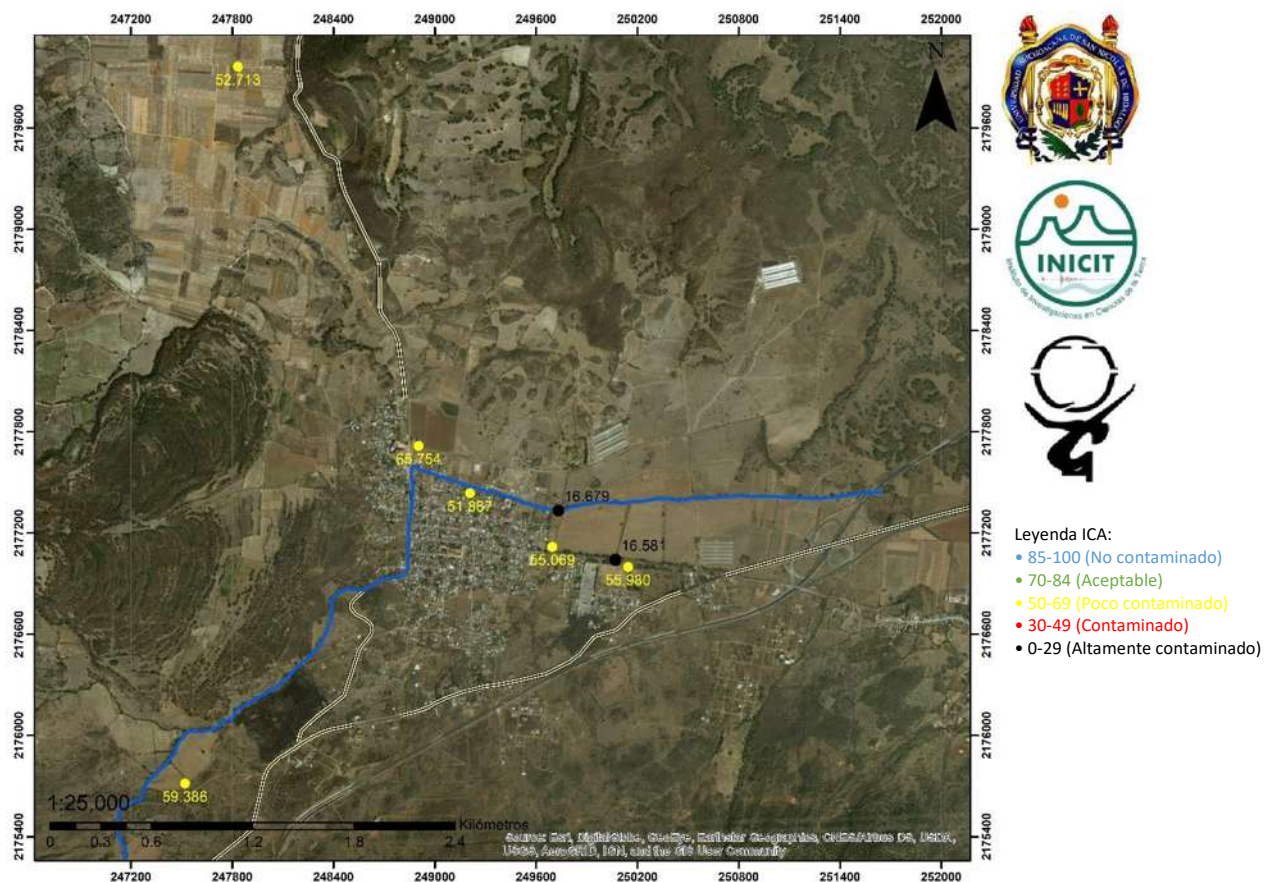


Figura 53. Localización de los pozos de extracción de agua subterránea y las descargas de aguas residuales clasificadas con respecto al ICA.

La Tabla 20 nos indica las recomendaciones para las muestras de agua en la comunidad, siendo las aguas residuales, las que no se recomiendan para ninguna actividad humana, económica o industrial. Sin embargo, las muestras de los pozos de extracción de agua subterránea presentan valores que van de 51 a 65, indicando aguas de calidad dudosa y con necesidad de tratamiento.

El pozo Artesanos tiene el valor de ICA menor, se localiza dentro de la localidad y es el más importante de la zona, puesto que la mayoría de los habitantes se abastece de él. Este pozo presenta un valor de 51.88, sin embargo, es importante recalcar que durante la toma de muestra, fue necesario apagar el sistema de cloración del pozo, con la intención de determinar las propiedades sin ningún tipo de tratamiento previo al agua.

El resto de los pozos de extracción de agua subterránea muestreados, no cuentan con un sistema de cloración, por lo tanto, el agua está siendo consumida directamente del pozo sin tratamiento previo. El pozo con valores similares al Artesano, es el del campo de cultivos, que abastece a las comunidades de Joyitas y San Bernabé. Presenta un valor de ICA de 52.71, siendo el que necesita un mayor tratamiento para su consumo, al no contar con un sistema de cloración. Es importante recalcar que el pozo se encuentra al centro de una amplia superficie de campos de cultivo y podría verse afectado por la actividad agrícola.

Los pozos de la Secundaria (55.9), Buenavista (55.0) e Iratzio (59.3), presentan valores de ICA similares, necesitando un tratamiento del agua para el consumo humano, estos pozos están ubicados muy cerca de la localidad.

Finalmente, el pozo que presenta un valor de ICA mayor (65.7), es el pozo superficial, el cual es importante acentuar que es un pozo privado y que el agua es utilizada únicamente para el consumo del ganado y el riego de una sola familia. Este pozo presenta el tirante de agua a escasos 5 metros de la superficie y tampoco cuenta con un sistema de cloración.

5.3. Elementos traza en agua

Se obtuvieron las concentraciones de As, Cu, Zn y Fe de las muestras de los pozos de extracción de agua subterránea y de las descargas de aguas residuales, los cuales se presentan a continuación:

Tabla 21. Valores de elementos traza en las muestras de agua subterránea y residuales en la comunidad de Capula, Mich.

Muestra	As	Cu	Zn	Fe
	mg/L			
Pozo Artesano	<l/d	<l/d	<l/d	<l/d
Pozo Campos cultivo	<l/d	<l/d	<l/d	<l/d
Pozo superficial	<l/d	<l/d	0.005	<l/d
Pozo secundaria	0.0017	<l/d	<l/d	<l/d
Pozo Buenavista	0.0028	<l/d	0.006	<l/d
Pozo Iratzio	0.0002	<l/d	0.005	<l/d
Residual 1	0.0064	0.059	0.731	3.597
Residual 2	0.0020	0.042	0.47	2.148

*l/d = Límite detectado

5.3.1. Arsénico en agua

En la gráfica 11 se comparan las concentraciones de arsénico de las distintas muestras las cuales ninguna rebasa las Normas Mexicanas 0.01 mg/L NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004 (DOF, 2004) y 0.05 mg/L para agua potable NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 1994).

El arsénico se encuentra en aguas subterráneas naturalmente a concentraciones menores de 0.001 mg/L (Edmunds *et al.*, 1989; Welch *et al.*, 2000) porque el mineral que se encuentra en el subsuelo, al estar tanto tiempo en contacto con el agua, termina por disolverse.

Las concentraciones altas no se restringen a determinadas condiciones del ambiente o a contaminación antropogénica. Se han encontrado altas concentraciones en acuíferos con condiciones oxidantes y de pH alto, acuíferos en condiciones reductoras, acuíferos con circulación geotermal, acuíferos afectados por procesos ligados a la actividad minera o relacionados con depósitos minerales, y acuíferos ligados a otros procesos antropogénicos (actividad industrial, asentamientos urbanos, actividad agropecuaria, etc.). Sin embargo, la mayor parte

de los acuíferos con contenidos altos de arsénico tienen un origen ligado a procesos geoquímicos naturales relacionados con metasedimentos con filones mineralizados, formaciones volcánicas, formaciones volcano-sedimentarias, distritos mineros, sistemas hidrotermales actuales, cuencas aluviales terciarias y cuaternarias, etc. (Boyle *et al*, 1998; Smedley y Kinniburgh, 2002).

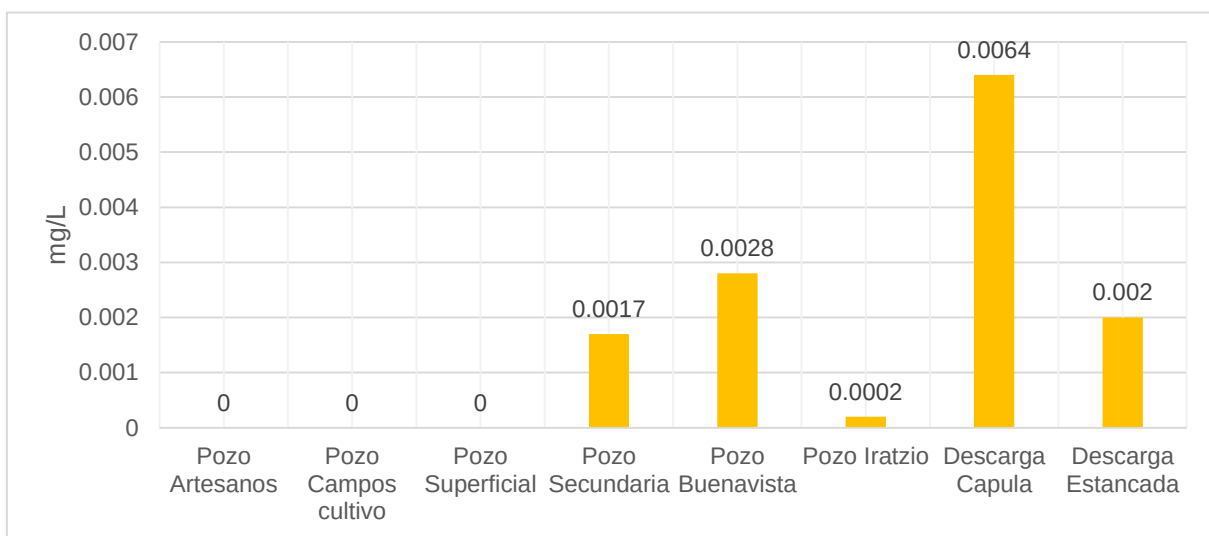


Figura 54. Concentración de arsénico en las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.

5.3.2. Cobre en agua

En la Figura 55 es posible observar las concentraciones de Cu en las muestras de agua y ninguno de los casos rebasa la NOM-127-SSA1-1994 (2 mg/L para agua potable; DOF, 1994)

Los límites naturales encontrados para el Cu en aguas subterráneas son de entre 0.001 y 0.005 mg/L (Jiménez *et. al.* 1998). Las concentraciones encontradas en los puntos de descarga son muy altas para tener un origen natural. La muestra Residual 1 (Descarga Capula) es la única que rebasa el límite indicado.

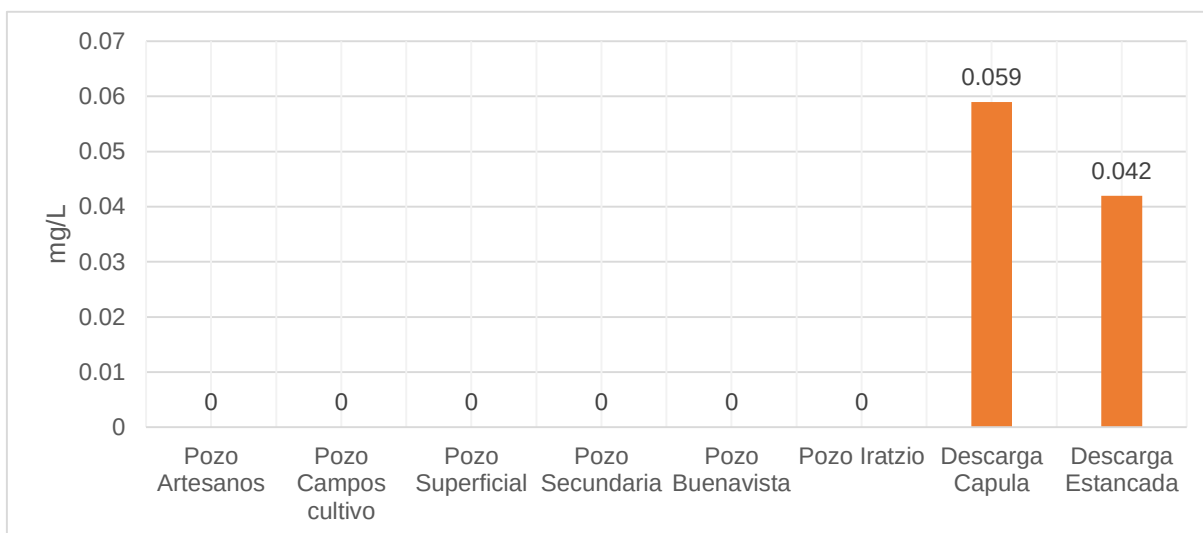


Figura 55. Concentración de cobre en las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.

5.3.3. Zinc en agua

De acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 1994), el límite permisible para la concentración de Zinc en agua potable es de 5 mg/L. La Figura 56 nos muestra que en ninguno de los casos se rebasa el límite de la NOM. Por otro lado, la concentración natural de Zn en agua dulce es de 0.1 mg/L (Jiménez *et. al.* 1998).

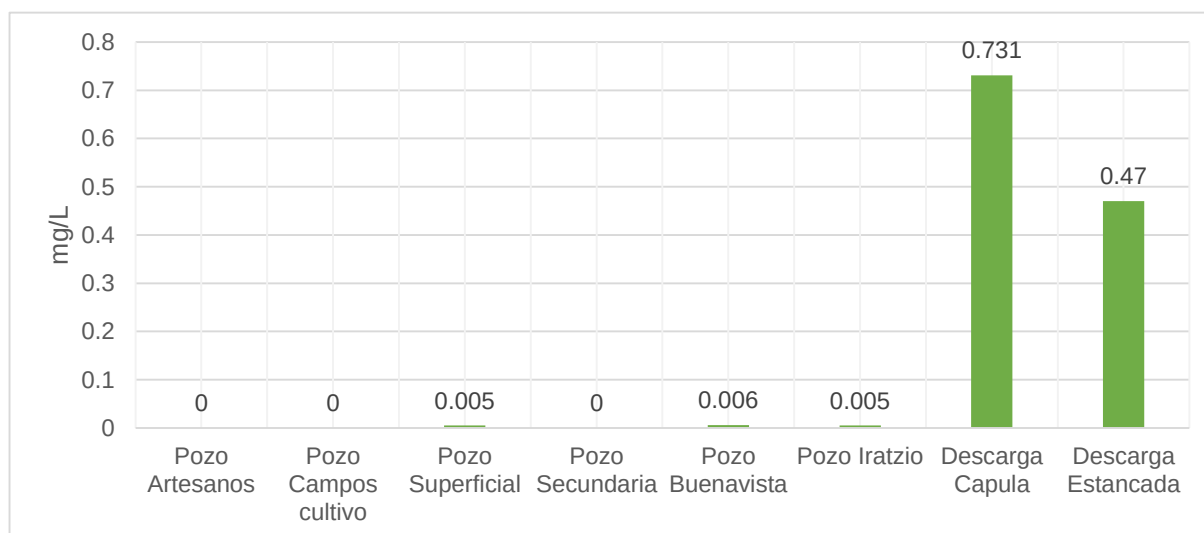


Figura 56. Concentración de zinc en las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.

El origen del Zn puede ser industrial, siendo un subproducto de la mezcla o producción de latón y bronce, metales galvanizados para tuberías, utensilios, insecticidas, caucho, tintas, etc.; también puede formar parte en la composición de algunos insecticidas, fertilizantes y abonos (Illescas *et al.*, 1996).

5.3.4. Hierro en agua

De acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994, el límite permisible para la concentración de Hierro en agua potable es de 0.3 mg/L. La Figura 57 nos muestra que este límite es rebasado por ambas muestras de aguas residuales.

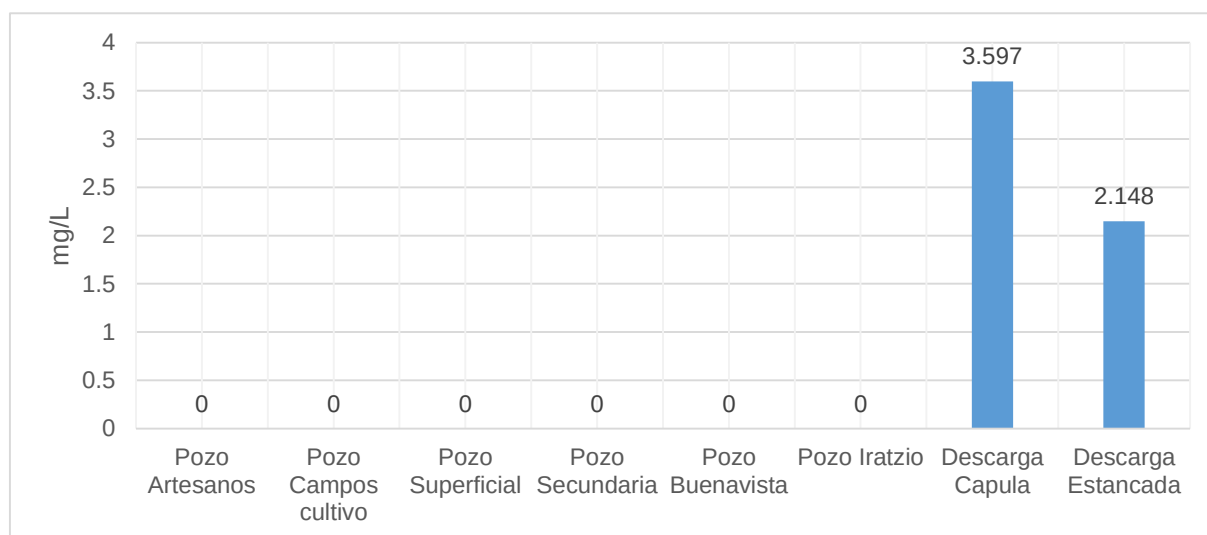


Figura 57. Concentración de hierro en las muestras de agua subterránea y residual de la comunidad de Capula, Mich.

En aguas residuales el Fe se encuentra en forma trivalente y en concentraciones de 0.1 a 0.3 mg/L, pero el Fe^{2+} se encuentra a mayores proporciones en condiciones anóxicas, esto indica que en aguas residuales la concentración de Fe es más elevada que las encontradas en aguas subterráneas, además de que esta especie

suele formar complejos con la materia orgánica presente, como lo son las zonas de descarga o aguas residuales.

5.4. Análisis estadístico de componentes principales para agua

La Figura 58 muestra el análisis de componentes principales de las variables fisicoquímicas del agua y los elementos traza identificados, en ella se explica el 92.5% del comportamiento de las muestras estudiadas. La Figura 44 indica que el Índice de Calidad del Agua (ICA) utilizado anteriormente, fue el apropiado dado que la mayoría de las variables están directamente relacionadas y no presentan diferencias significativas.

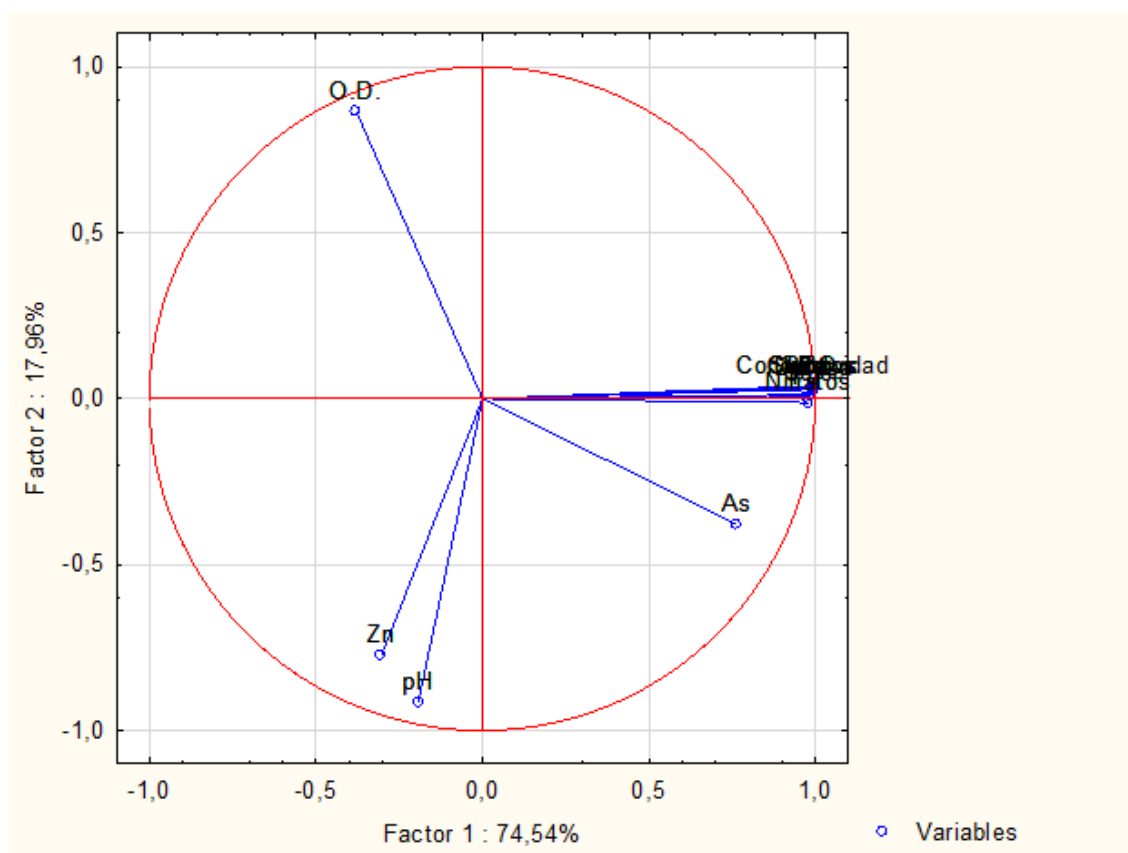


Figura 58. Diagrama de componentes principales de las variables fisicoquímicas usadas para determinar el ICA y la concentración de metales traza.

El oxígeno disuelto no se relacionó con las variables involucradas en el ICA, esto es debido a que las aguas muestreadas son subterráneas y en este tipo de sistemas, la concentración de oxígeno disuelto es bajo, por lo que no se considera determinante. El pH se relaciona directamente con la concentración de zinc y arsénico.

El arsénico se encuentra en las aguas naturales como especie disuelta. El estado de oxidación del arsénico, y por tanto su movilidad, están controlados fundamentalmente por las condiciones redox (potencial redox, Eh) y el pH. También se observa que el As tiene una relación inversa con el oxígeno disuelto, lo que significa que el oxígeno disuelto disminuye si la concentración de As crece, lo cual indicaría la oxidación de alguna especie del As, lo que es indicativo de una reactividad química en el ambiente y por tanto un indicio de disponibilidad (Figura 59).

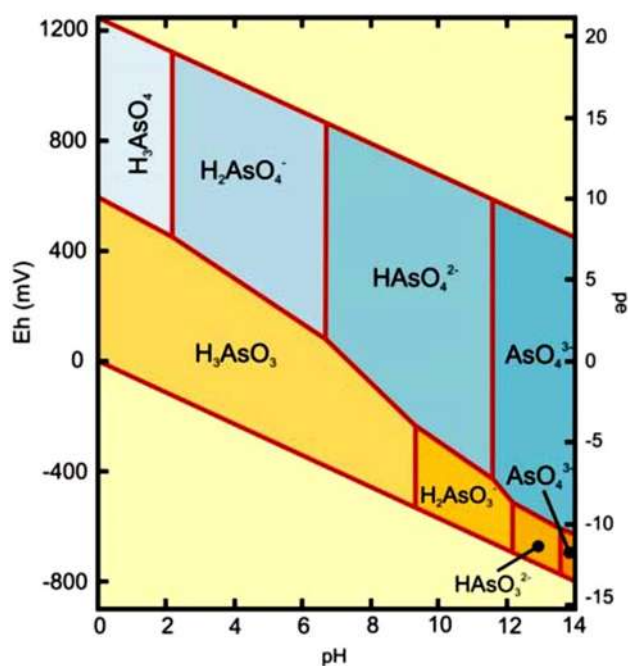


Figura 59. Diagrama Eh-pH de especies acuosas de arsénico en el sistema As–O₂–H₂O a 25°C y 1 bar de presión total (Brookins, 1988; Yan *et al.*, 2000).

El arsénico es un elemento muy singular por su sensibilidad a movilizarse en los valores de pH típicos de las aguas subterráneas (pH 6.5-8.5). Como aproximación,

y sin tener en cuenta otros factores como contenido de materia orgánica. En condiciones oxidantes, el estado As (V) predomina sobre As(III), encontrándose fundamentalmente como H_2AsO_4^- a valores de pH bajos (inferiores a 6.9), mientras que a pH más alto, la especie dominante es HAsO_4^{2-} (en condiciones de extrema acidez, la especie dominante será H_3AsO_4 , mientras que en condiciones de extrema basicidad, la especie dominante será AsO_4^{3-}) (Brookins, 1988; Yan *et al.*, 2000).

Es muy posible que la especie que se encontró en las muestras de agua cumpla el siguiente equilibrio:

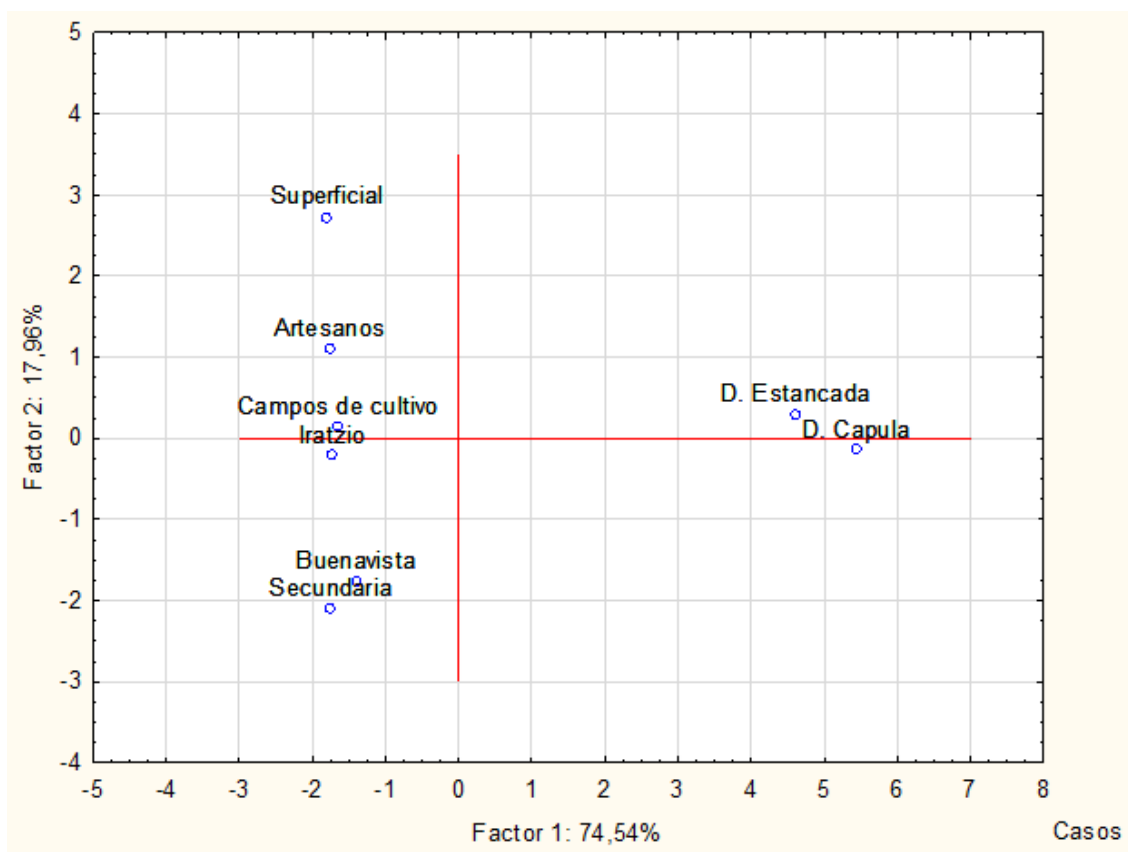
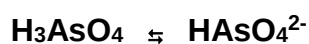


Figura 60. Diagrama de componentes principales de los casos estudiados

En la Figura 60 se muestra el diagrama de componentes principales para los distintos casos estudiados.

Se observa que el comportamiento de las muestras de aguas residuales (Estancada y Capula) se relaciona con las variables principales que componen el ICA. Esto significa que las variables involucradas en el ICA tienen un peso determinante en la composición de estas aguas, además de que los niveles elevados en las concentraciones de Fe son posiblemente consecuencia de las mismas.

El oxígeno disuelto es la variable que distingue al pozo superficial, artesanos y campos de cultivo. Por último, en los pozos Iratzio, Secundaria y Buenavista, los factores determinantes en su muestreo fueron el pH y su relación con los metales traza, ya que los tres pozos presentan concentraciones detectables de As y presentan los niveles de pH más elevados.

5.5. Resultados físicos y químicos del suelo

En este apartado se muestran los resultados de las propiedades físicas y químicas y elementos traza en los suelos de la comunidad de Capula, Mich.:

Tabla 22. Propiedades fisicoquímicas de las muestras de los suelos.

No. De Muestra	Humedad (%)	pH	C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)*
1	30.6	7.7	1,327.9
2	18.1	7.0	853.1
3	24.0	7.3	822.8
4	16.5	7.2	825.1
5	10.6	7.1	790.5
6	27.5	7.6	909.6
7	8.8	7.1	1,743.3
8	7.7	7.5	1,069.5
9	28.0	6.9	1,160.3
10	20.0	6.9	975.8
11	15.8	7.4	431.1

12	20.1	6.1	645.2
13	9.9	6.7	726.9
14	10.6	6.7	1,041.5
15	19.9	6.3	1,644.3
16	19.2	6.7	447.7
17	15.9	7.1	556.2
18	21.0	7.5	546.4
19	13.9	6.9	1,201.4
20	13.5	7.1	746.9
21	11.7	7.7	2,703.1
22	2.1	7.4	1,341.9
23	15.0	6.8	1,864.9
24	9.4	7.0	1,668.5
25	16.8	6.2	829.9
26	9.1	7.2	633.8
27	3.9	7.9	731.5
28	30.9	6.9	1,034.7
29	10.8	7.2	713.9
30	9.4	7.0	1,079.7

*C.E = Conductividad eléctrica corregida por temperatura.

5.5.1. Humedad en suelo

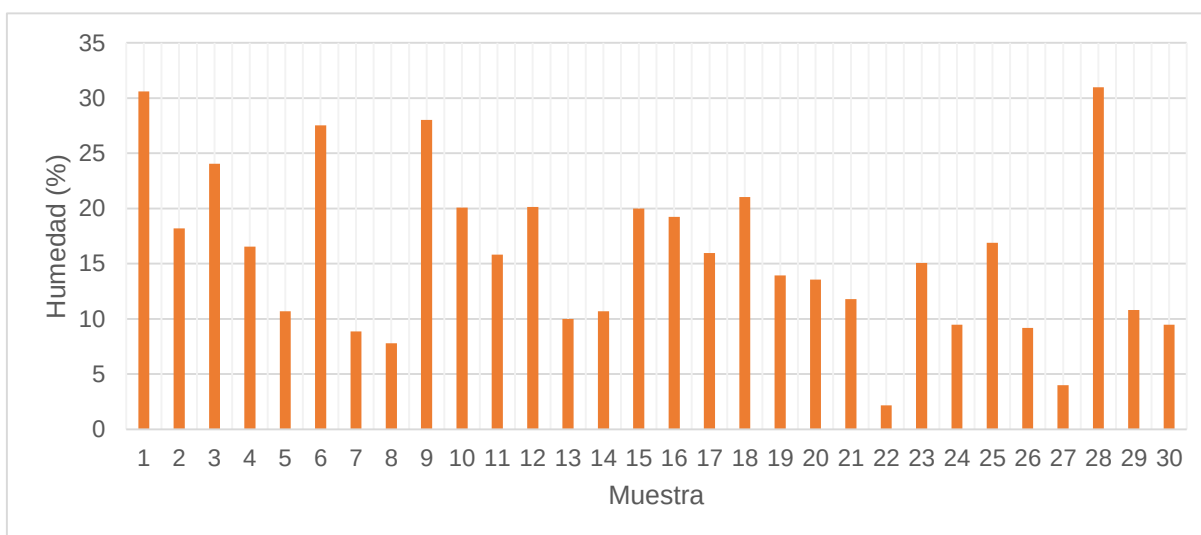


Figura 61. Porcentaje de humedad de las muestras de suelo de Capula, Mich.

La mayoría de las muestras, presentan un alto porcentaje de humedad, llegando hasta el 30%, esto se debe a la superficialidad de la toma de muestras, ya que gran parte de los patios estudiados se utilizan para el desecho de las aguas residuales empleadas en el trabajo de alfarería, manteniendo la humedad constante.

5.5.2. pH en suelo

Tabla 23. Clasificación de suelos según el pH según la NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2000 b)

<i>Clasificación</i>	<i>pH</i>
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1 – 6.5
Neutro	6.6 – 7.3
Medianamente alcalino	7.3 – 8.5
Fuertemente alcalino	>8.5

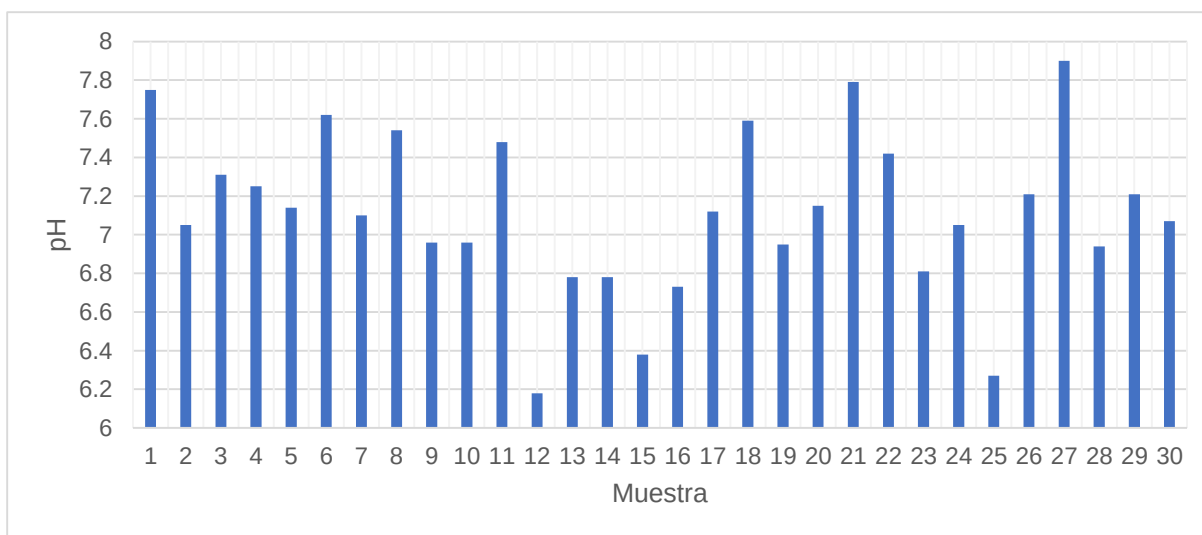
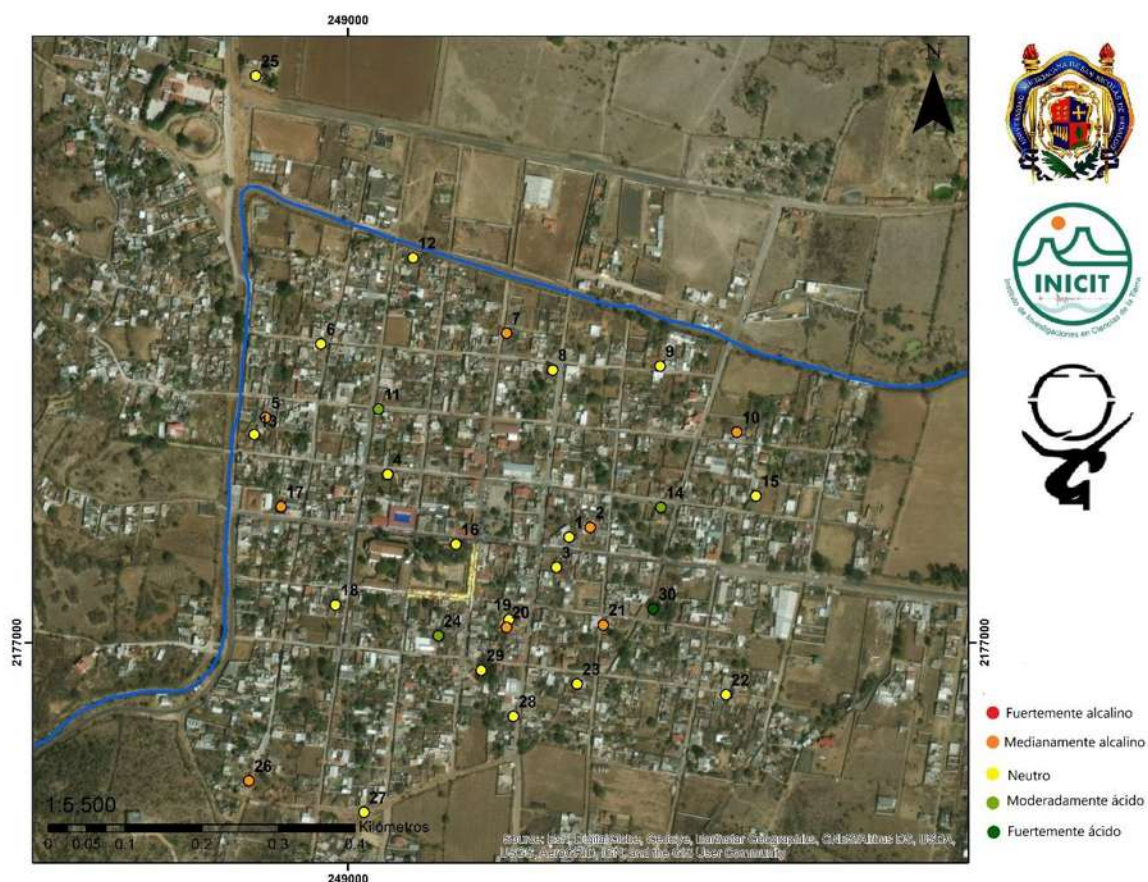


Figura 62. pH de las muestras de suelo de Capula, Mich.

El pH del suelo controla las reacciones químicas que determinan si los nutrientes y metales traza van a estar o no disponibles (solubles o insolubles) para su adsorción. Los niveles de pH son distintos para cada tipo de suelo, pero según su pH pueden clasificarse como suelos ácidos, neutros y alcalinos (Tabla 23).



iones presentes, sus concentraciones total y relativa, su movilidad, la temperatura del líquido y su contenido de sólidos disueltos.

La determinación de la conductividad eléctrica es, por lo tanto, una forma indirecta de medir la salinidad del agua o extractos de suelo. La Tabla 24 nos indica el tipo de suelo según la salinidad derivada de la conductividad eléctrica.

Tabla 24. Clasificación de suelos según la salinidad (conductividad eléctrica) (Vázquez, 1993).

Clasificación	Valor (mmhos/cm)
No salino	0 – 2,000
Poco salino	2,100 – 4,000
Moderadamente salino	4,100 – 8,000
Muy Salino	8,100 – 16,000
Fuertemente alcalino	>16,000

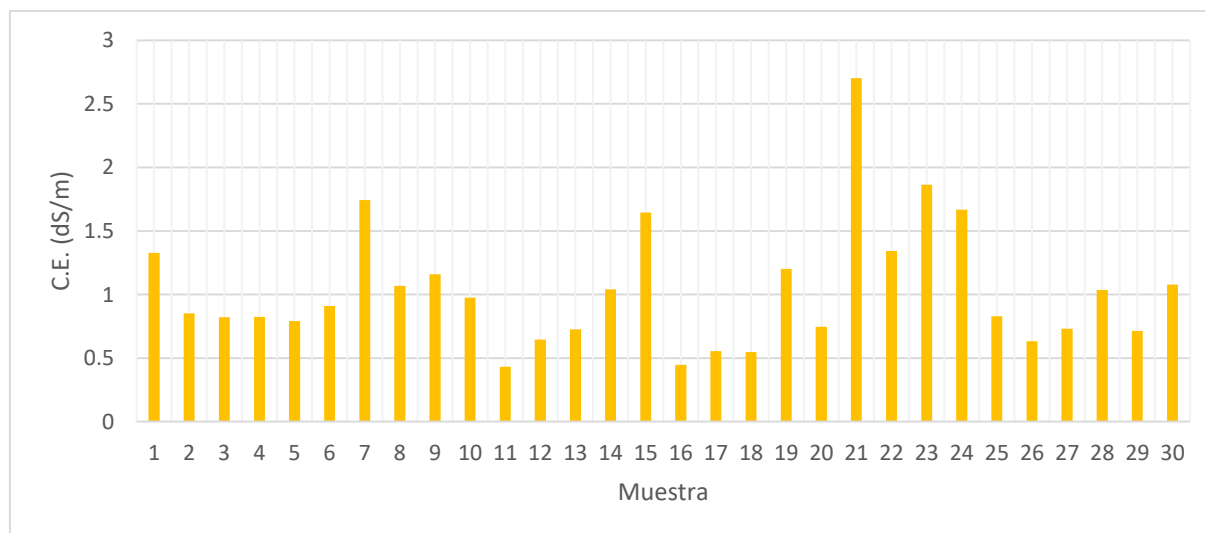


Figura 64. Conductividad eléctrica de las muestras de suelo de Capula, Mich.

De acuerdo con la Tabla 24, todos los suelos son no salinos, a excepción de la muestra 21 que indica que es un suelo poco salino.

5.5.4. Clase textural de los suelos

Tabla 25. Porcentaje de partículas y clase textural de las muestras de suelo.

No. De Muestra	Arenas (%)	Limos (%)	Arcilla (%)	Clase textural
1	55.28	32.72	12.00	Franco arenoso
2	77.28	14.72	8.00	Franco arenoso
3	45.28	36.72	18.00	Franco
4	54.00	26.00	20.00	Franco arenoso
5	48.00	34.00	18.00	Franco
6	38.00	38.00	24.00	Franco
7	36.00	36.00	28.00	Franco arcilloso
8	41.28	36.72	22.00	Franco
9	44.00	34.00	22.00	Franco
10	48.00	30.00	22.00	Franco
11	34.00	32.00	34.00	Franco arcilloso
12	34.00	30.00	36.00	Franco arcilloso
13	32.00	38.00	30.00	Franco arcilloso
14	56.00	26.00	18.00	Franco arenoso
15	52.00	28.00	20.00	Franco arenoso
16	62.00	26.00	12.00	Franco arenoso
17	46.00	34.00	20.00	Franco
18	38.00	38.00	24.00	Franco
19	48.00	30.00	22.00	Franco
20	38.00	38.00	24.00	Franco
21	58.00	22.00	20.00	Franco arenoso
22	84.00	6.00	10.00	Arenoso franco
23	46.00	36.00	18.00	Franco
24	52.00	28.00	20.00	Franco arenoso
25	42.00	34.00	24.00	Franco
26	54.00	30.00	16.00	Franco arenoso
27	68.00	22.00	10.00	Franco arenoso

28	56.00	30.00	14.00	Franco arenoso
29	45.28	36.72	18.00	Franco
30	56.00	28.00	16.00	Franco arenoso

La clase textural de los suelos varía de Franca a Franco arenosa. La mayoría de las texturas francas se encuentran al NO, correspondiendo de acuerdo al INEGI a un Leptosol, en cambio, las texturas más franco arenosas se ubican en su mayoría en la parte SE en Luvisoles. Es importante hacer mención que, dada la irregularidad de los suelos en las viviendas, en muchas de ellas se utilizó un relleno que consistía en gran cantidad de arenas y gravas para la nivelación del mismo. Por lo tanto, debido a que el muestreo fue de los primeros 10 cm a partir de la superficie, es posible justificar el alto porcentaje de arena presentes en las muestras. Las muestras franco arcillosas presentes, corresponden a suelos ubicados en el extremo NO de la zona de estudio y corresponde a viviendas donde no se practica la actividad artesanal.

Considerando la granulometría de las partículas en los suelos, la zona más superficial presenta alto porcentaje de arenas y limos, ayudando a la rápida infiltración de líquidos, ya sea naturales como agua de lluvia o residuales como aguas utilizadas en la actividad artesanal.

En la Figura 65, es posible observar la distribución espacial de las muestras tomadas en el poblado, con el fondo de suelo correspondiente, de acuerdo a la carta edafológica de INEGI. El color grisáceo corresponde a Leptosol y el amarillo a Luvisol.

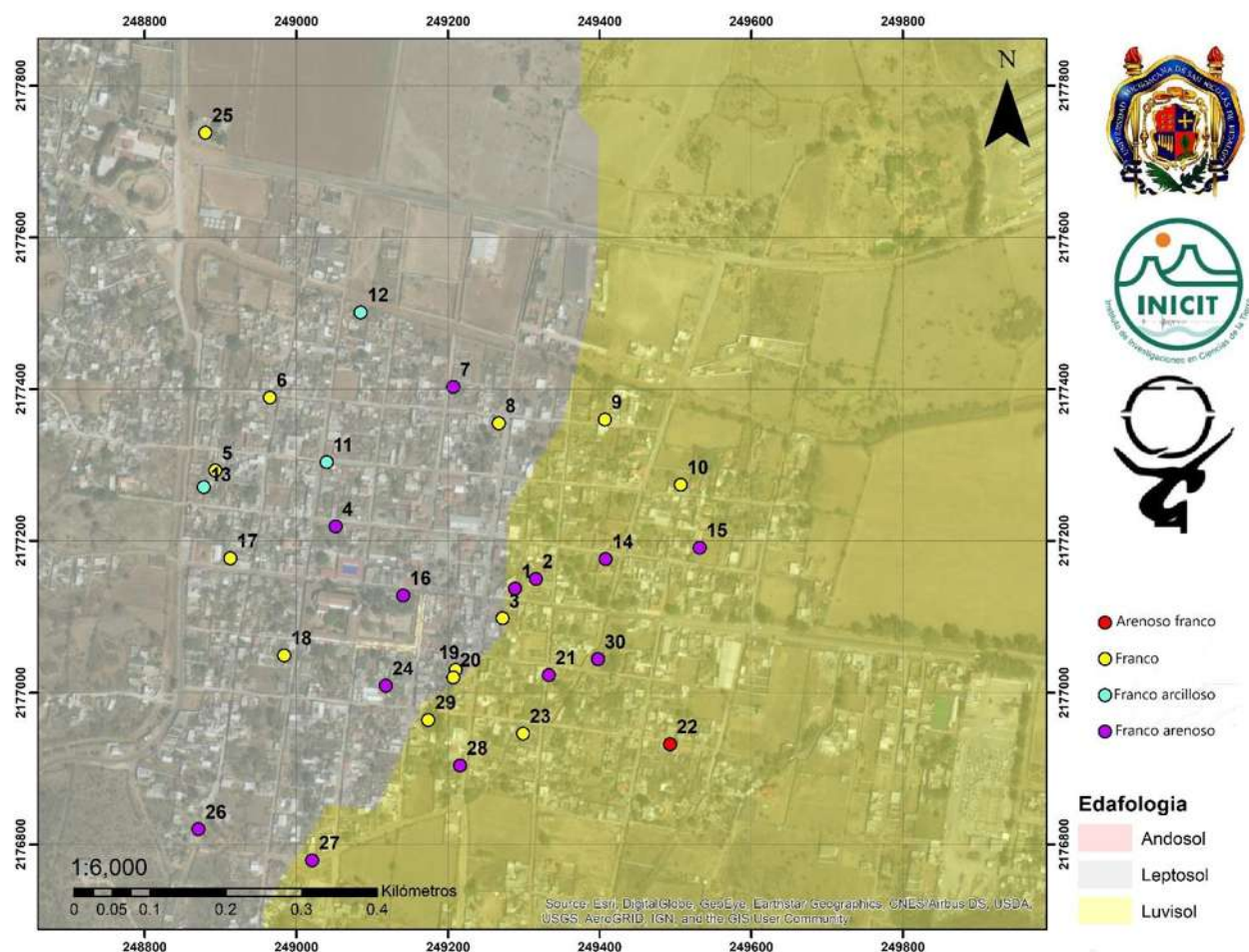


Figura 65. Distribución espacial de las muestras de suelo de acuerdo a su clase textural.

5.6. Elementos traza en suelos

Se obtuvieron las concentraciones de As, Cu, Zn y Fe de las muestras de suelos obtenidas en la comunidad de Capula, los cuales se presentan a continuación:

Tabla 26. Concentraciones de metales traza de las muestras de suelo.

Muestra	As	Cu	Zn	Fe
	mg/kg			
1	1.529	51.6	319	4602
2	1.611	123.7	263	3,578.4
3	1.07	40.6	221.7	4,854.6
4	1.193	37.8	199.2	5,068.2
5	1.385	24.3	133.8	4,099.2
6	1.474	28.8	181.2	4,095.8
7	0.858	20.7	90.6	4,963.8
8	1.029	29.4	135.9	3,961.2
9	1.159	33.7	134.7	4,612.6
10	1.132	23.1	117.3	3,367.6
11	0.981	25.3	185.7	5,537
12	1.31	39.8	111.6	4,927.4
13	1.214	23	183.3	4,289.6
14	1.33	39.9	82.8	4,051.4
15	1.022	17.8	84.6	3,268.2
16	1.186	25	178	4,980.6
17	1.563	42.3	67.2	3,797.2
18	1.084	25.5	204.6	5,307.2
19	2.008	35.6	95.1	3,935.2
20	1.351	43.8	40	5,107.2
21	1.508	19.1	24.9	2,350.8
22	0.351	3.7	121	3,889
23	1.447	42.4	91	2,936
24	1.364	52	68.7	3,496.8
25	1.44	26	71	5,139.6
26	1.405	45.1	48.6	3,350.8
27	1.179	17.2	67.2	2,456.8
28	1.227	35.4	43.5	4,351
29	1.166	34.1	35.4	3,642.2

30	1.207	63	30.3	2,736
----	-------	----	------	-------

De los parámetros físicos y químicos previamente obtenidos de las 30 muestras de suelo muestreadas, se desprenden diversas variables que dan características determinantes a los mismos, las cuales podrían afectar la interacción y disponibilidad de los metales traza.

Como se mencionó en la introducción, el Fe no es un metal traza, por lo que fue descartado del análisis ya que se encuentra a grandes concentraciones, particularmente en suelos volcánicos como los muestreados.

La disponibilidad de un elemento depende de las características del suelo en donde se encuentra. Los parámetros medidos en esta tesis pueden ser usados para valorar la sensibilidad de los suelos ante las agresiones contaminantes de los metales traza.

La mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido porque son menos fuertemente adsorbidos, excepto As, Mo, Se y Cr, que son más móviles a pH alcalino. Los suelos arcillosos retienen más metales por adsorción o en el complejo de cambio de los minerales de la arcilla. Por el contrario, los arenosos carecen de capacidad de fijación y puede contaminarse el nivel freático (Bourg, 1995).

Se analizaron por componentes principales las variables estudiadas junto con la concentración de metales traza para saber cuál de estos datos era un factor significativo.

En la Figura 66 se observa el diagrama de componentes principales para las variables estudiadas, donde se indica que el pH y la conductividad eléctrica (C.E.) no son variables significativas, en cambio, los limos y arcillas se relacionan directamente con la concentración de metales traza; específicamente los limos se relacionan aún más directamente con la concentración de As y Cu y las arcillas con la concentración de Zn. Las arenas tienden a relacionarse indirectamente con los limos, por lo tanto también se relaciona indirectamente con el As y el Cu.

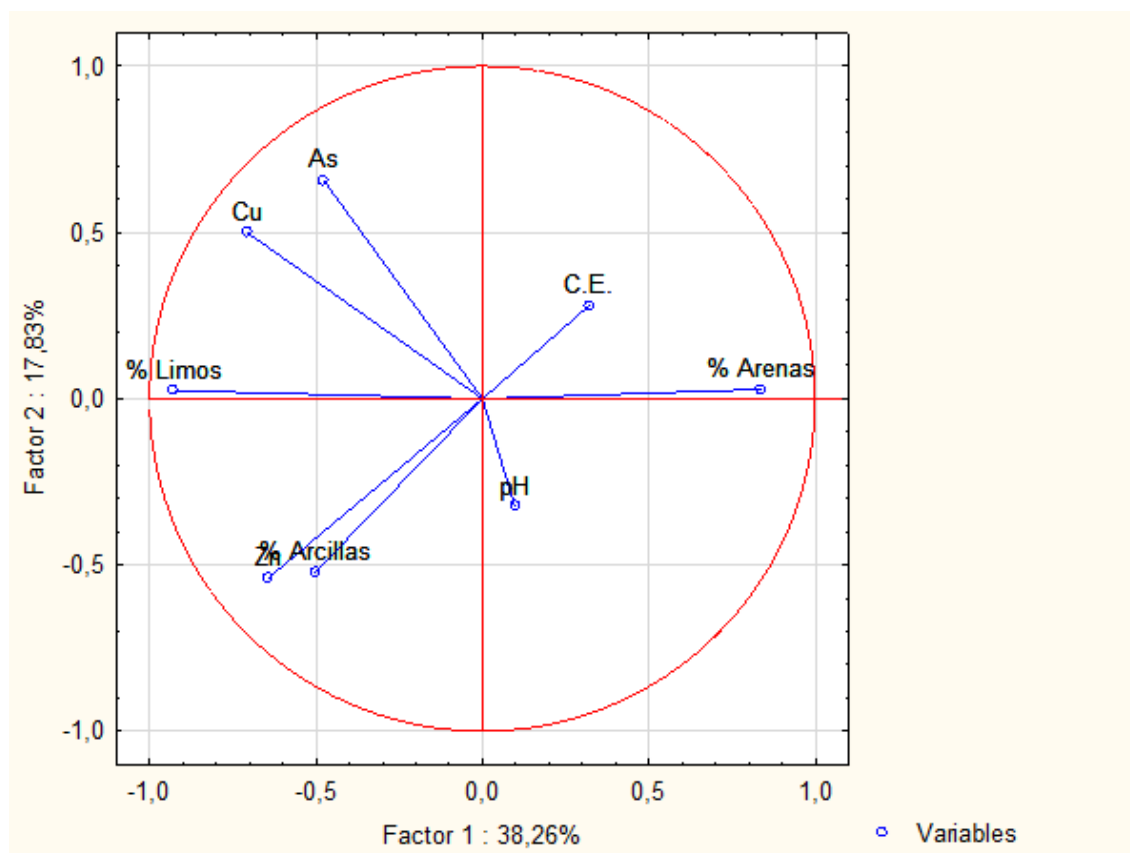


Figura 66. Diagrama de componentes principales de las variables estudiadas en las muestras de suelo.

En la Figura 67 se muestra el diagrama de componentes principales de las variables expuestas en el trabajo junto con la concentración de los metales traza As, Cu y Zn pero eliminando del análisis al pH y la C.E., lo cual permite observar y confirmar claramente la relación entre los limos y arcillas con las concentraciones de metales traza y la relación indirecta de las arenas pero, en esta ocasión, no solamente con limos sino también con las arcillas.

Este análisis confirma la premisa de que los metales estarán más fuertemente asociados a suelos limo-arcillosos y que si tienen un carácter más arenoso la concentración de metales traza disminuirá.

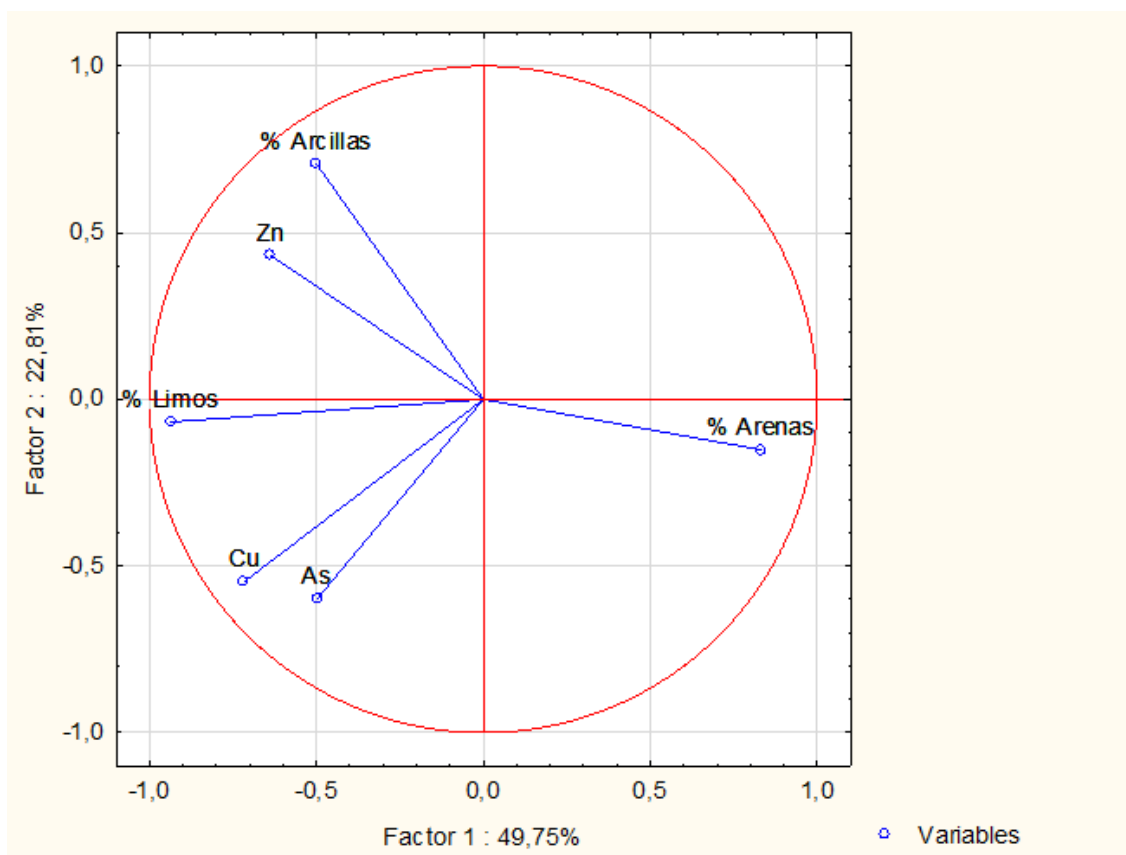


Figura 67. Diagrama de componentes principales de las variables estudiadas en las muestras de suelo sin considerar pH y C.E.

Los elementos traza están presentes en relativamente bajas concentraciones (mg/kg) en suelos y pueden ser tóxicos si se superan ciertos límites. El As, Cu y Zn son considerados micronutrientes pero son tóxicos si se ingieren o inhalan en concentraciones suficientemente altas y durante largos períodos de tiempo (Siegel, 2002).

Los elementos traza más abundantes en los suelos pueden clasificarse en cinco categorías, de acuerdo con la forma química en que se encuentran en las soluciones del suelo: cationes (Ag^+ , Cd^{+2} , Co^{+2} , Cr^{+3} , **Cu^{+2}** , Hg^{+2} , Ni^{+2} , Pb^{+2} , **Zn^{+2}**), metales nativos (Hg, V), aniones (**AsO_4^{-3}** , CrO_4^{-2} , MnO_4^{-2} , HSeO_3^- , SeO_4^{-2}), halogenuros (F^- , Cl^- , Br^- , I^-), y organocomplejos (Ag, As, Hg, Se, Te, Ti). Estas categorías no se

excluyen mutuamente porque algunos elementos pueden aparecer con más de una forma (Bowen, 1979).

Por lo tanto, se tienen dos metales representativos de los cationes (Cu y Zn) y un metal que puede ser considerado un anión (revisar análisis de agua: Arsénico en agua) y/o un organocomplejo (As).

Normalmente las concentraciones naturales de Zn en suelos varían entre 1 - 1500 mg/kg, Cu y As entre 0.1 y 250 mg/kg (Bowen, 1979). Valores muy superiores a estos se consideran anómalos y biotóxicos. Estos tres metales se consideran muy tóxicos y a la vez fácilmente disponibles en muchos suelos en concentraciones que sobrepasan los niveles de toxicidad.

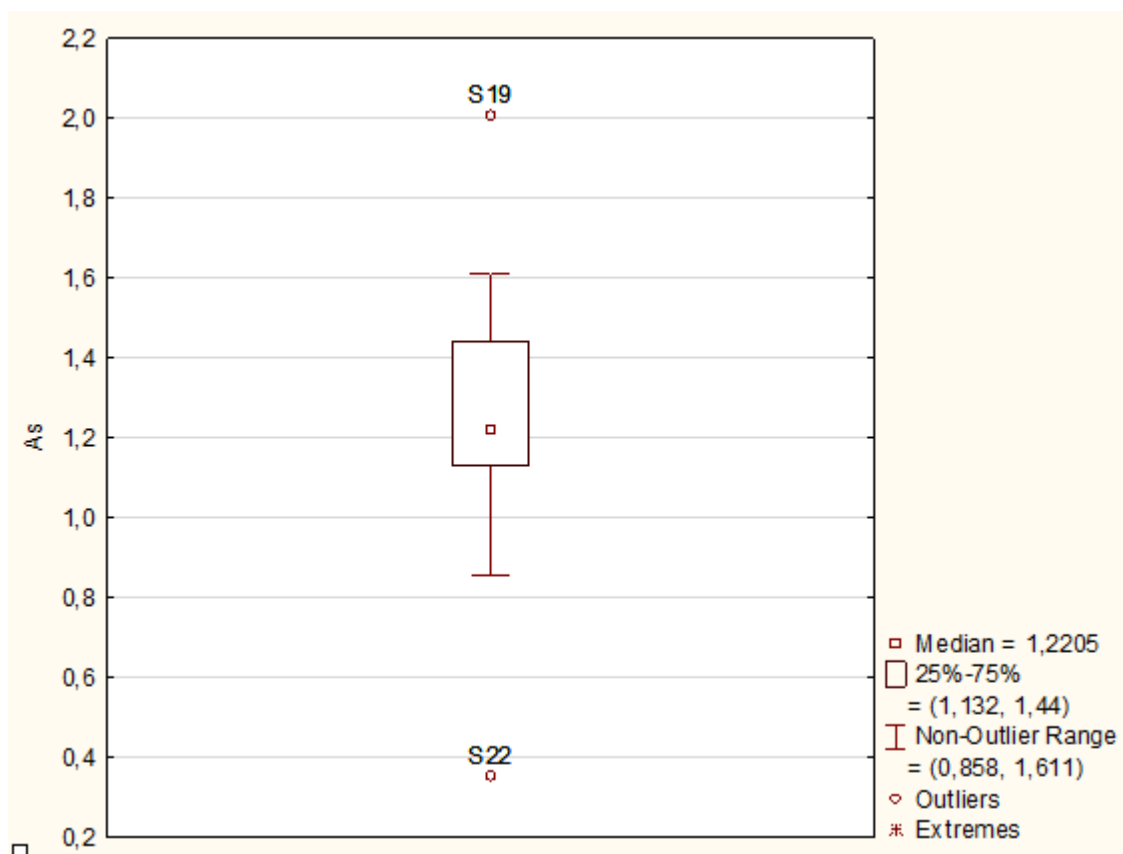


Figura 68. Diagrama de cajas para la concentración de As en las muestras de suelo.

El As y el Cu son fácilmente movilizados por la actividad humana en proporciones que exceden en gran medida la de los procesos geológicos y son considerados en la lista de contaminantes prioritarios de la US Environmental Protection Agency (US EPA) (Bowie & Thornton, 1985).

En la Figura 68 se observa el diagrama de cajas de la concentración de As en las muestras de suelo analizadas. Esta gráfica indica que la mediana de las 30 muestras es de 1.2205 mg/kg, esto quiere decir, que las concentraciones de As son bajas y que, al igual que las muestras fuera del límite (S19 y S22), no rebasan los parámetros naturales para considerar que está en una concentración toxica.

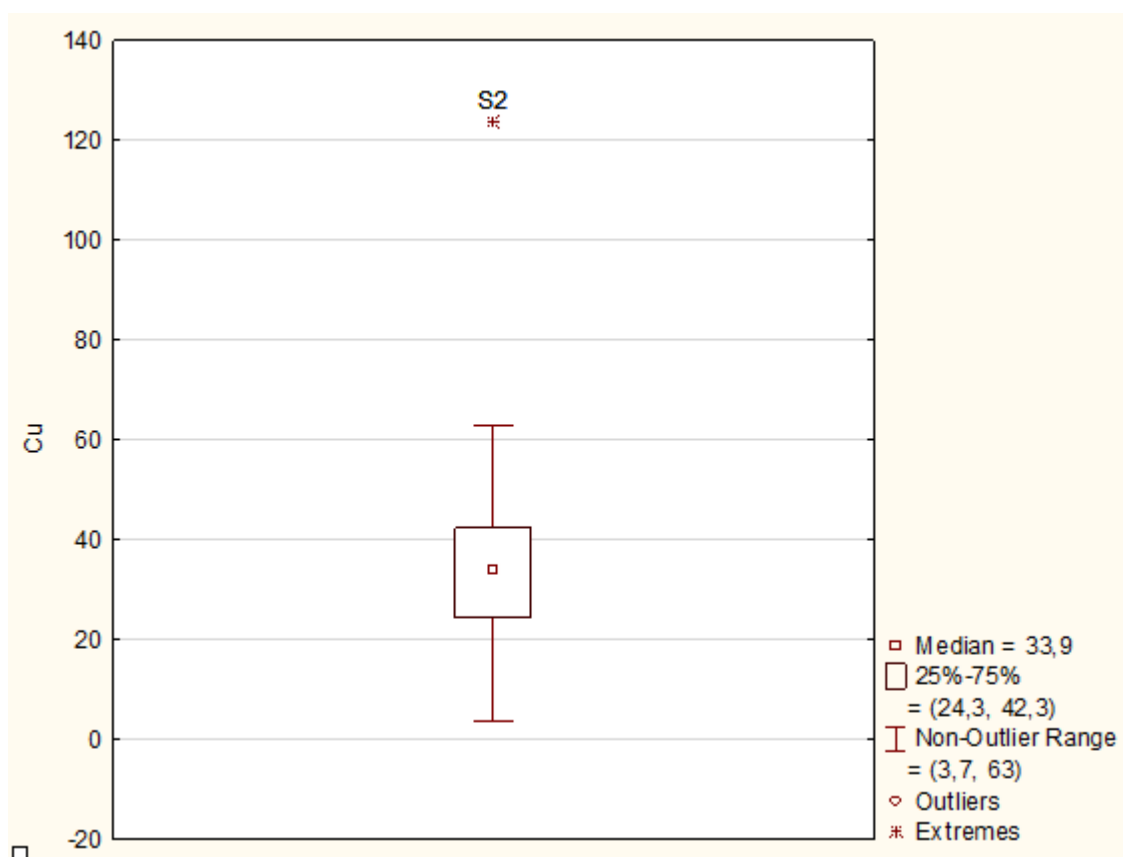


Figura 69. Diagrama de cajas para la concentración de Cu en las muestras de suelo.

La Figura 69 muestra el diagrama de caja de la concentración de Cu en las muestras de suelo analizadas. Esta gráfica muestra que la mediana de las 30 muestras es de 33.9 mg/kg, su concentración más alta es de 63 mg/kg, lo cual indica que no sobrepasan los límites naturales para considerarlo una concentración tóxica.

El estudio muestra un valor extremo dentro de las muestras de suelo, el S2 presenta un valor de casi el doble del límite superior total de las muestras. El S2 tiene una concentración mayor a los 120 mg/kg que aún no es considerada anómala pero sí un indicio de que específicamente en ese punto de muestro está enriquecido con Cu.

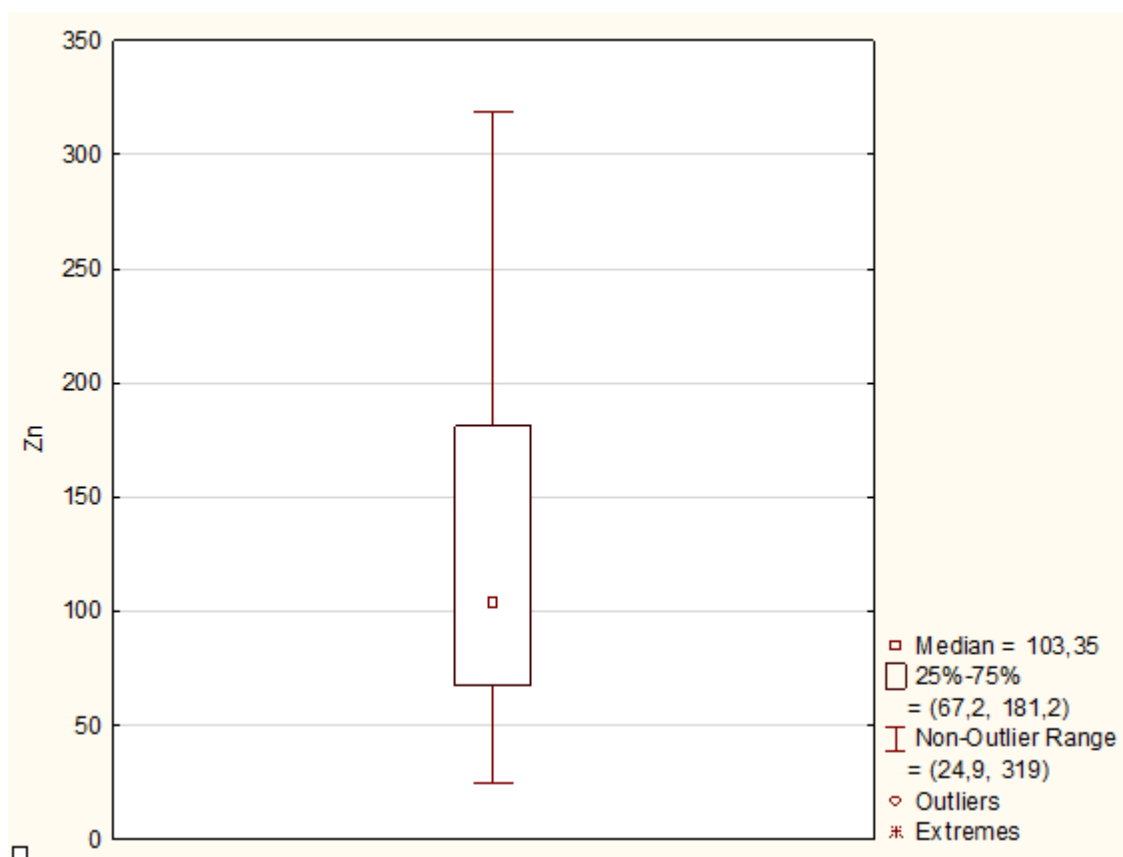


Figura 70. Diagrama de cajas para la concentración de Zn en las muestras de suelo.

La Figura 70 muestra el diagrama de caja de la concentración de Zn en las muestras de suelo analizadas. La mediana de las 30 muestras es de 103.35 mg/kg, su concentración más alta es de 319 mg/kg, la cual no sobrepasa los límites naturales para considerarlo una concentración toxica.

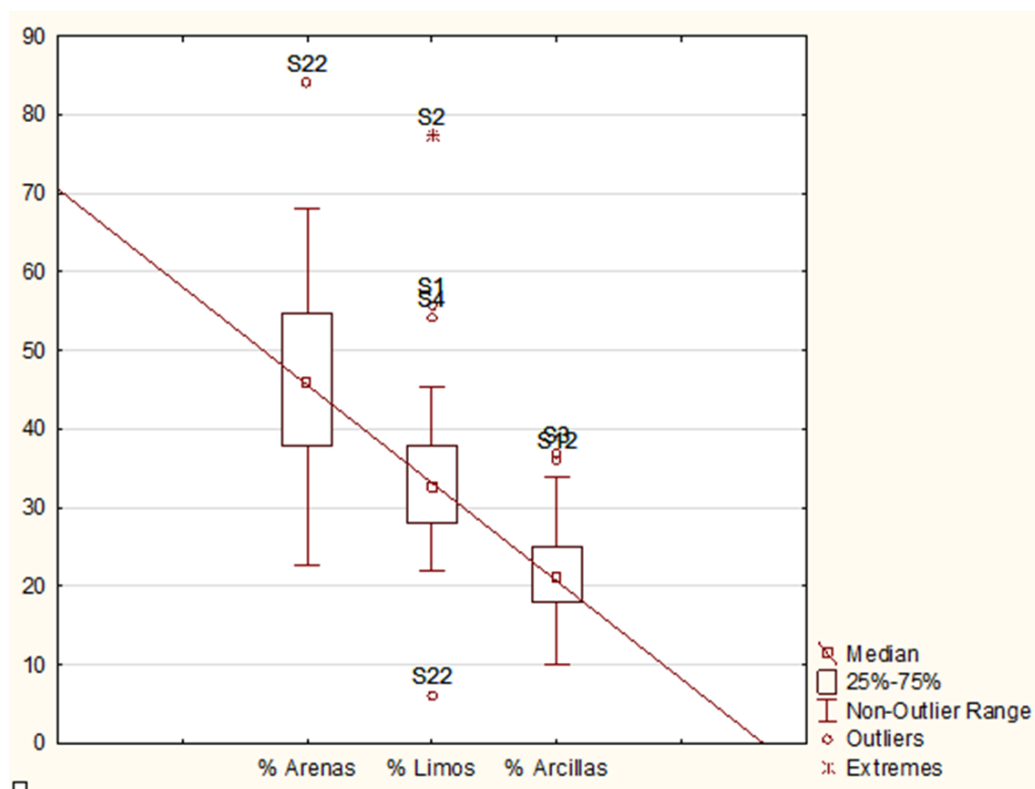


Figura 71. Diagrama de cajas de arenas, limos y arcillas en las muestras de suelo.

En la Figura 71 se observa el diagrama de cajas del porcentaje de arenas, limos y arcillas. Las tres variables tienen una relación lineal decreciente de arenas a arcillas, lo que significa que si crece el porcentaje de arenas, el porcentaje de limos y arcillas disminuye.

Las arenas tienen como valor medio 46%, sus límites superior e inferior son 68 y 22.72% respectivamente. Los limos presentan una media de 32.5%, su límite inferior

es de 22% y el superior es de 45.28%. Las arcillas tienen como valor medio 21%, su límite inferior se encuentra en el 10% y su límite superior tiene un valor del 34%.

La estación muestreada S22 tiene valores fuera de límite tanto para arenas como para limos, en arenas representa un valor por encima a los límites superiores y en limos representa un valor muy inferior a la mediana. Los suelos S1, S2 y S4 muestran porcentajes que sobrepasan el límite superior en limos, de hecho el S2 es un valor extremo, eso indica que tiene un valor “anómalo” de limos (solo considerando los valores analizados). Los suelos S3 y S12 también son estaciones “Outliers” ya que tienen valores ligeramente por encima del límite superior en arcillas.

A continuación se presentan las gráficas de dispersión de limos y arcillas junto con las concentraciones de metales traza. Este análisis se efectuó para saber si hay una relación positiva entre las variables que indicaría que los metales están retenidos por adsorción en los limos y arcillas.

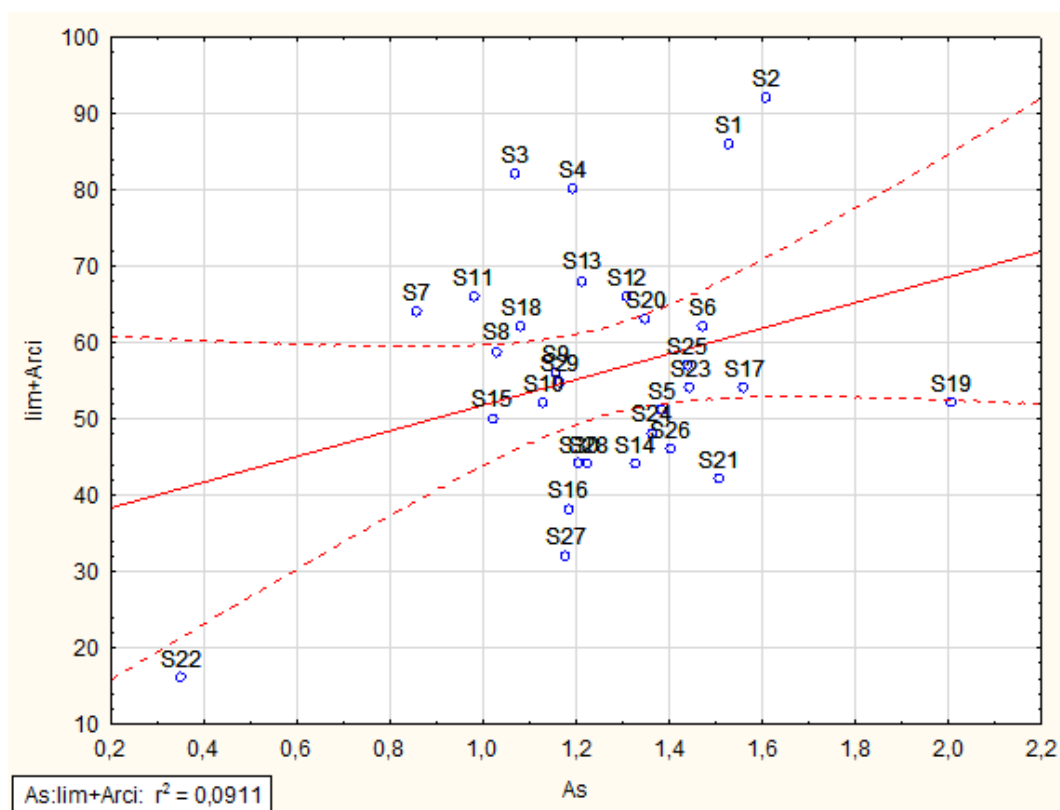


Figura 72a. Gráfica de dispersión As vs L+A.

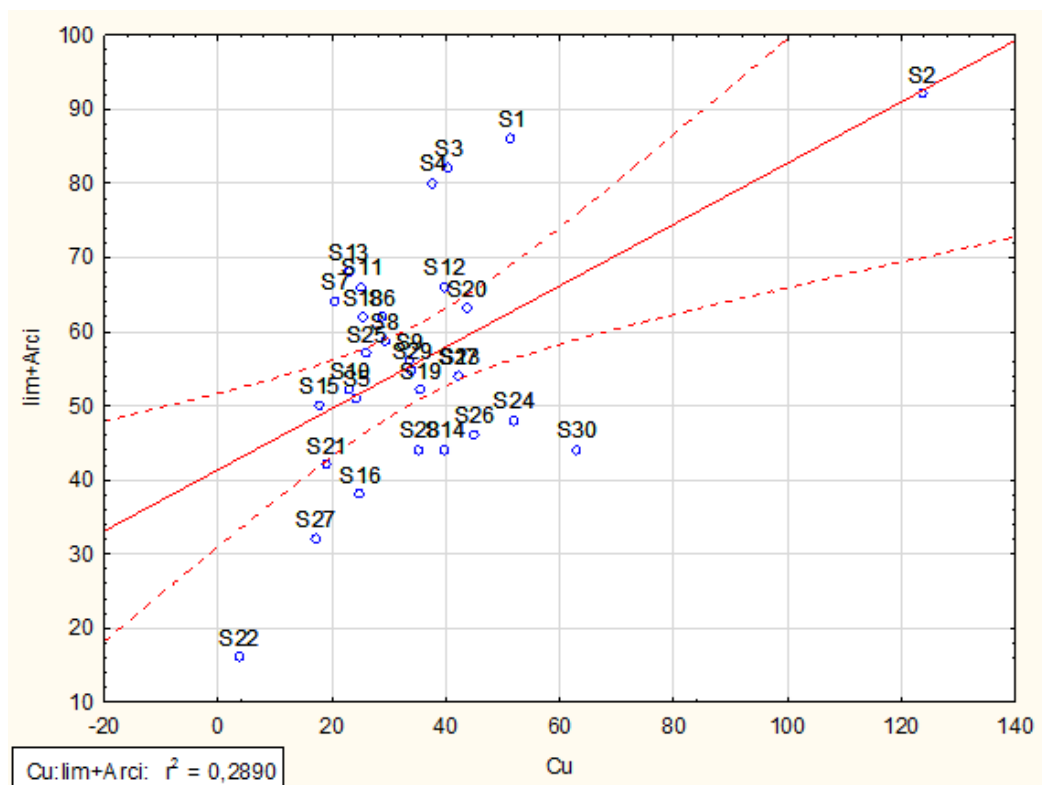


Figura 72b. Gráfica de dispersión Cu vs L+A.

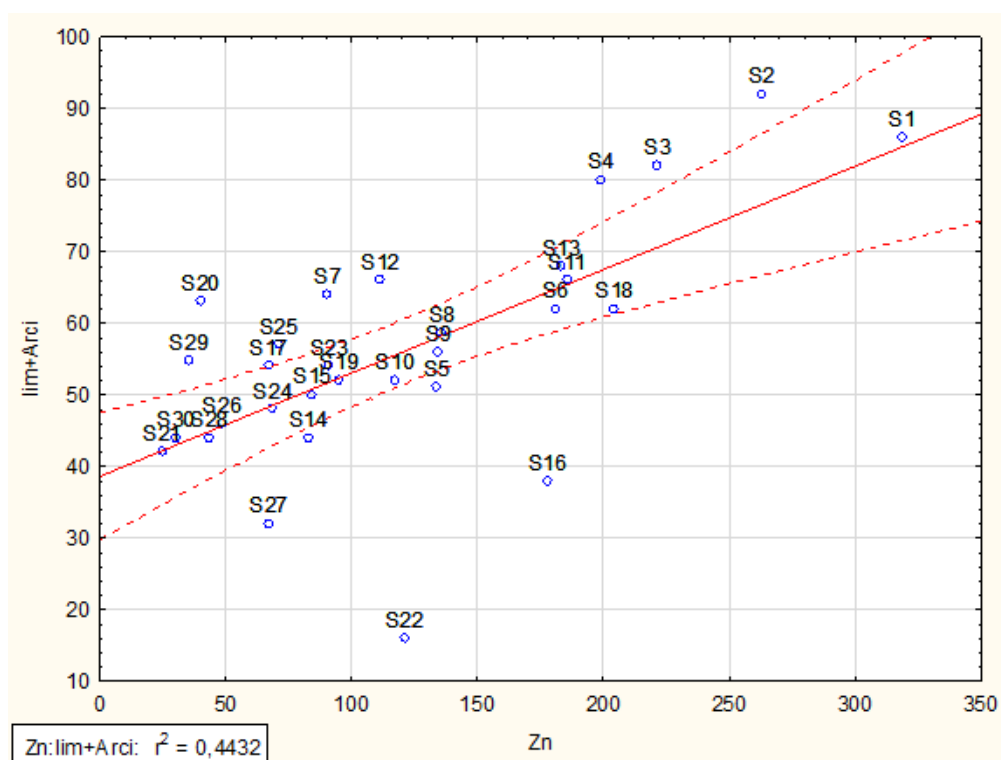


Figura 72c. Gráfica de dispersión Zn vs L+A.

En la Figura 72a nos muestra que el As no está correlacionado positivamente con los limos y arcillas, a pesar de mostrar una ligera tendencia a relacionarse la r^2 tan baja (0.091) indica que el As no se está reteniendo en limos y arcillas. La Figura 72b nos muestra al Cu que, a diferencia del As, muestra una r^2 mayor (0.289), lo que indica que el Cu sí se está reteniendo en los limos y arcillas. Las muestras fueron tomadas superficialmente, con esto se puede inferir que, a profundidades mayores el metal está más retenido por adsorción. Por último, la Figura 72c muestra que el Zn está positivamente relacionado con los limos y arcillas, tiene una r^2 (0.443) que indica que el Zn se encuentra ampliamente retenido en los limos y arcillas.

Por último, se muestra el diagrama de árbol (Figura 73) que agrupa a las muestras de suelo. El gráfico muestra que se forman tres grupos.

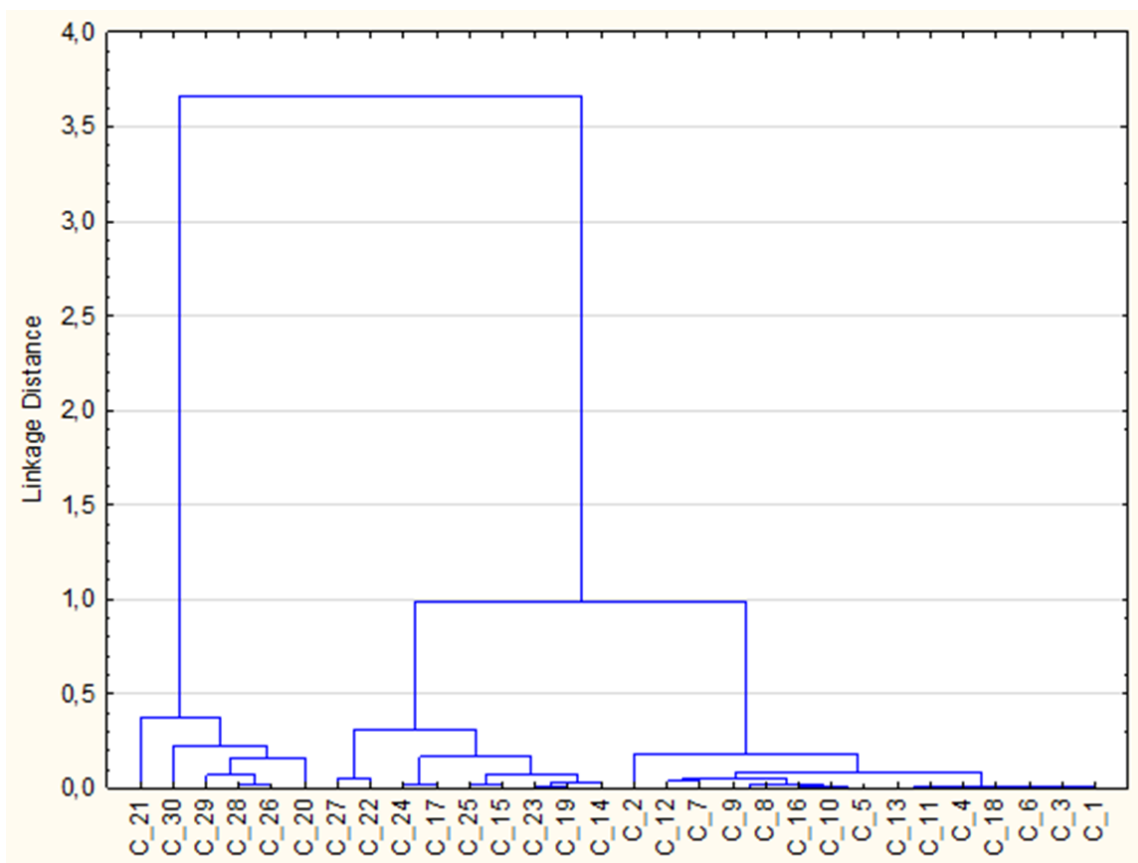


Figura 73. Diagrama de árbol de las muestras de suelo.

1er grupo: S21, S30, S29, S28, S26, S20 su principal característica es que son suelos arenosos, con pH de 7, con concentraciones altas de As (con respecto a las demás muestras de suelo), y concentraciones medias de Zn y Cu.

2do grupo: S27, S22, S24, S17, S25, S15, S23, S19, S14 son francoarenosos, con pH de 6 (a excepción del S7 que tiene un pH de 7.9), las concentraciones de metales son extremas. Tiene valores de As de 0.351 mg/kg del S22 y 2.009 mg/kg del S19. Lo mismo sucedió con Cu y Zn.

3er grupo: S2, S12, S7, S9, S8, S16, S10, S5, S13, S11, S4, S18, S6, S3, S1 este grupo tiene la característica de tener suelos franco arcillosos y las concentraciones más altas de metales traza.

A continuación se muestra la distribución de las concentraciones de los elementos traza identificados en el área. En la figura 74, se observa la distribución del As se encuentra en un valor más alto en la zona centro del área de estudio, a diferencia de las concentraciones más altas de Cu, ubicadas en la parte sur de la comunidad (Figura 75), las concentraciones mayores de Zn se localizan el sureste de la zona y entre las muestras 1, 2 y 3 (Figura 76).

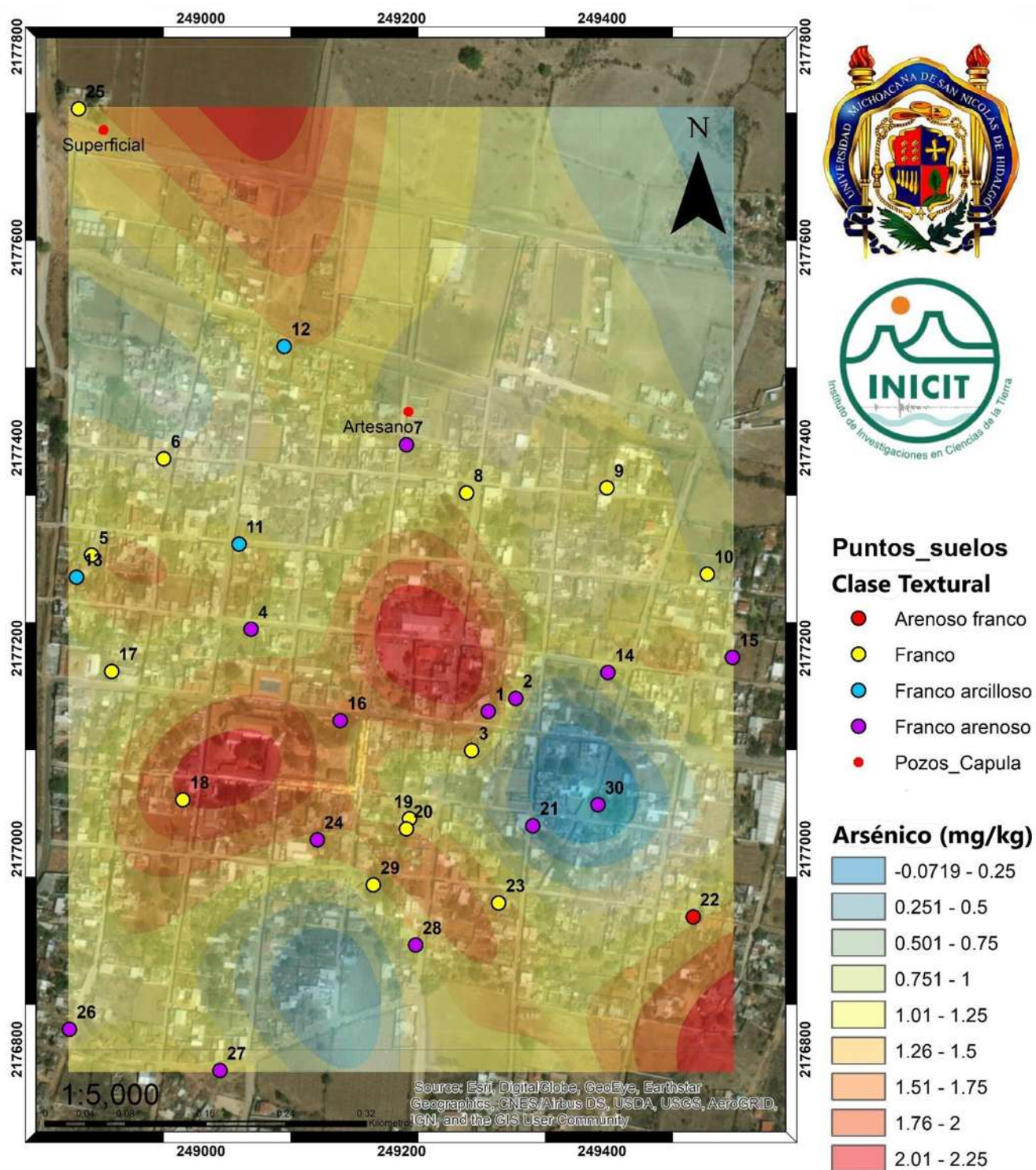


Figura 74. Mapa de distribución del arsénico en los suelos de la comunidad de Capula. Se presentan los puntos de muestreo con respecto a su clase textural.

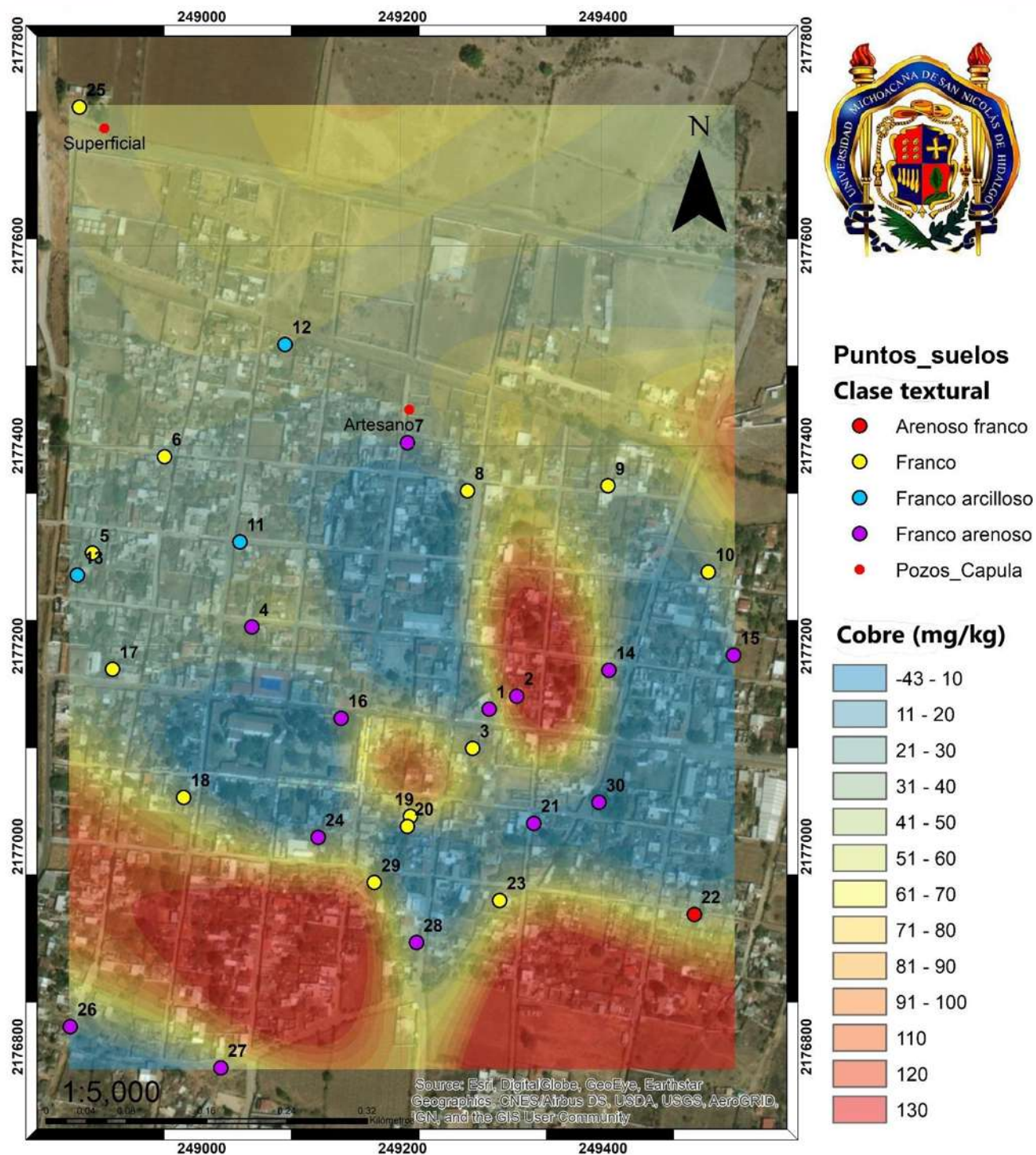


Figura 75. Mapa de distribución del cobre en los suelos de la comunidad de Capula. Se presentan los puntos de muestreo con respecto a su clase textural.

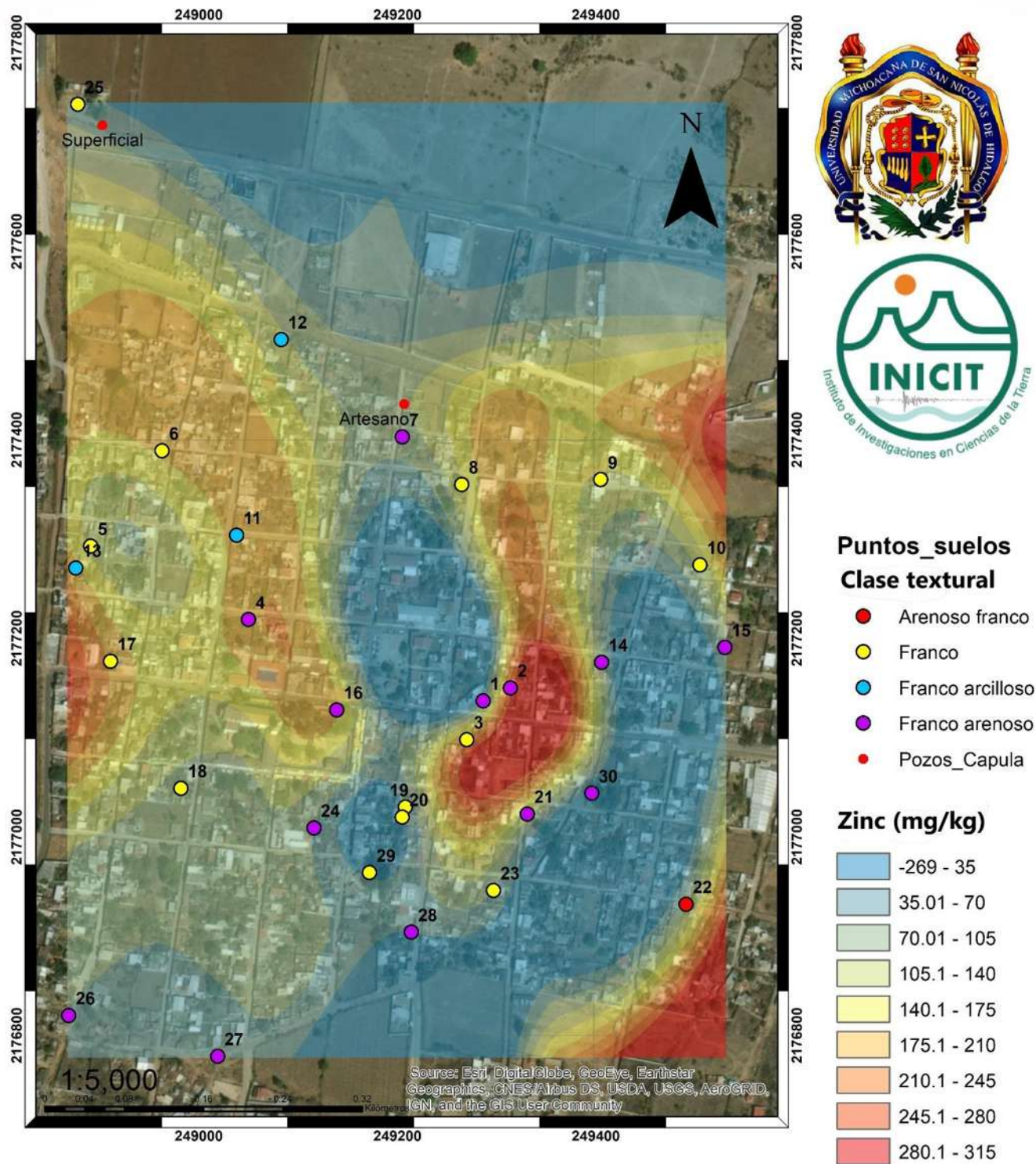


Figura 76. Mapa de distribución del zinc en los suelos de la comunidad de Capula. Se presentan los puntos de muestreo con respecto a su clase textural.

5.7. Disponibilidad de elementos traza

Al llevar a cabo el análisis de agua y de suelos, el único metal traza que puede estar en disponibilidad en el ambiente es el As. Para evaluar la disponibilidad en el ambiente de un elemento se tiene que cumplir el principio de que este no debe de estar fuertemente adsorbido. El medio en donde se presente el As debe tener un pH alcalino para que este tenga movilidad. En el caso de los suelos, el elemento estará más disponible en suelos arenosos y podría convertirse en un contaminante a nivel freático.

Al As lo podemos encontrar en el ambiente en dos formas o especies; anión (H_3AsO_4 , H_2AsO_4^- , HASO_4^{2-} , HASO_4^{3-}) y como un organocomplejo, pero al no tener los datos de materia orgánica nos enfocaremos en el anión.

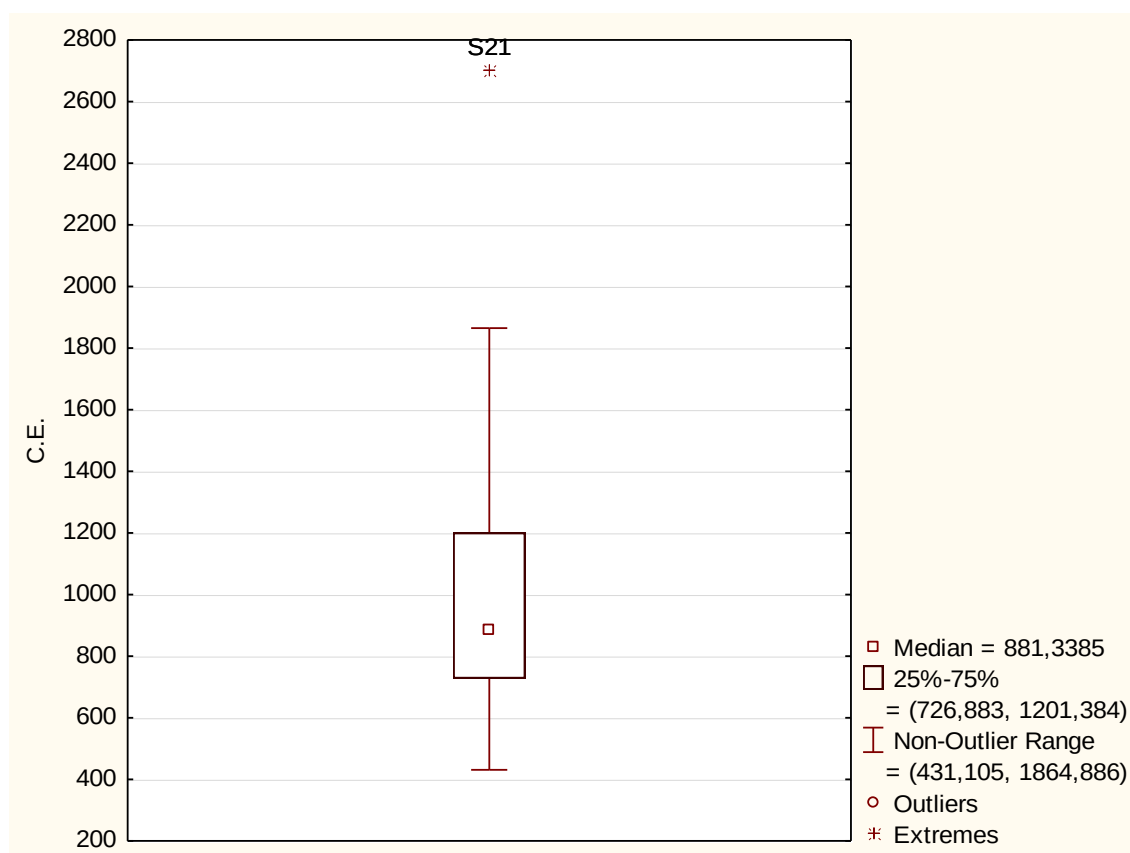


Figura 77. Diagrama de cajas de la conductividad eléctrica medida en las muestras de suelo.

En la Figura 77 se observa que los valores de C.E. (conductividad eléctrica) tienen un margen muy amplio. Su valor mínimo es 431.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el máximo es de 1864.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$, teniendo un valor extremo, el S21 el cual tiene un valor que sobrepasa los 2600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Para determinar la disponibilidad del As en el ambiente solo se tomó en cuenta a los suelos que están en el rango de 400 y 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

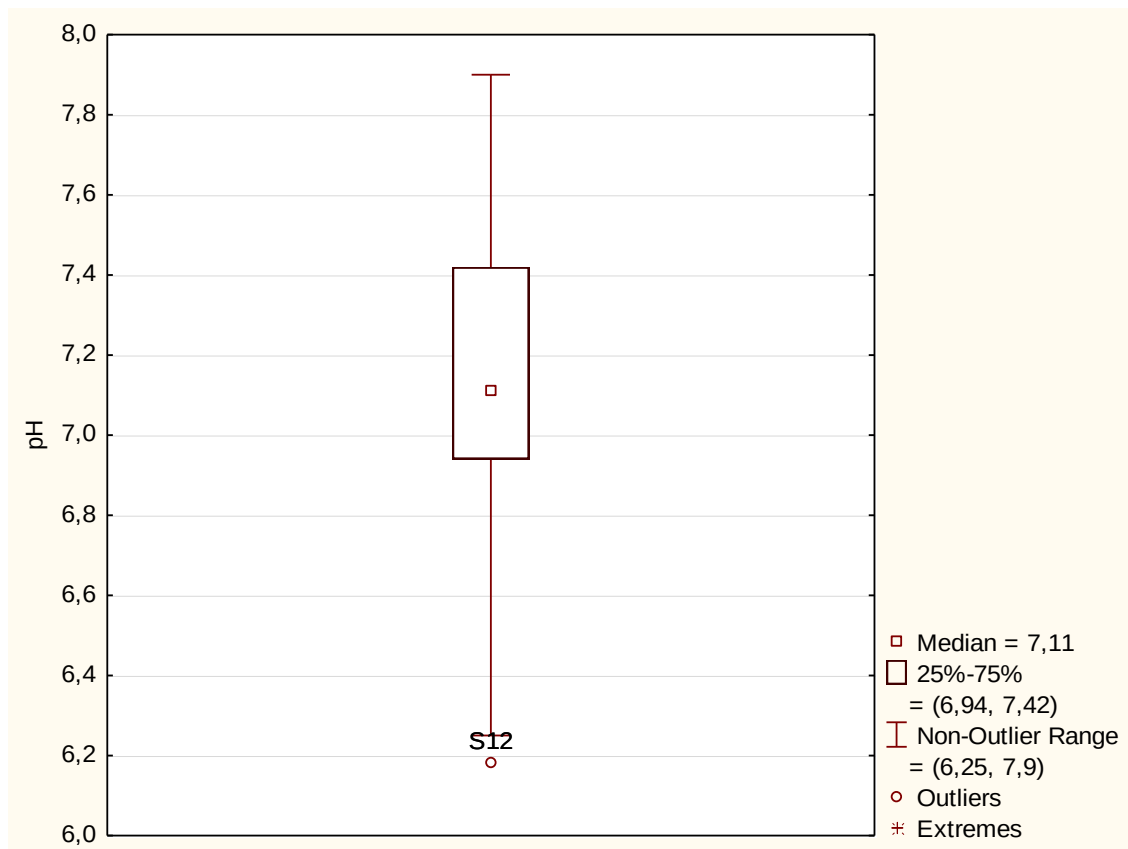


Figura 78. Diagrama de cajas del pH medido en las muestras de suelo.

En la Figura 78 se muestra que el pH tiene rangos que van desde 6.25 al 7.8. Para que el As tenga movilidad se necesitan pH alcalinos, por eso solo se tomaron en cuenta aquellos sitios en donde el pH es mayor a 7.

En la Figura 79 se observa que se tienen 3 posibles especies y dos posibles equilibrios.

A condiciones ligeramente acidas ($\text{pH} < 7$) y a C.E. superior a $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ se tienen las especies H_3AsO_4 y H_2AsO_4^- y el equilibrio entre ellos $\text{H}_3\text{AsO}_4 \leftrightarrow \text{H}_2\text{AsO}_4^-$. Este equilibrio es difícil que exista en el ambiente ya que las condiciones en él son mínimas para que se lleve a cabo. En cambio, el equilibrio $\text{H}_3\text{AsO}_4 \leftrightarrow \text{HAsO}_4^{2-}$ tiene mejores condiciones para llevarse a cabo. Es por eso que para determinar la disponibilidad del As en el ambiente se tomaron en cuenta solo los sitios que tengan suelos arenosos, $\text{pH} > 7$ y C.E. entre 400 y $800 \mu\text{S}/\text{cm}$. Los suelos que cumplen estas características son los siguientes: 2, 3, 4, 5, 17, 26 y 27, esto suelos son los que tienen las características para tener al anión del As (HAsO_4^{2-}) disponible.

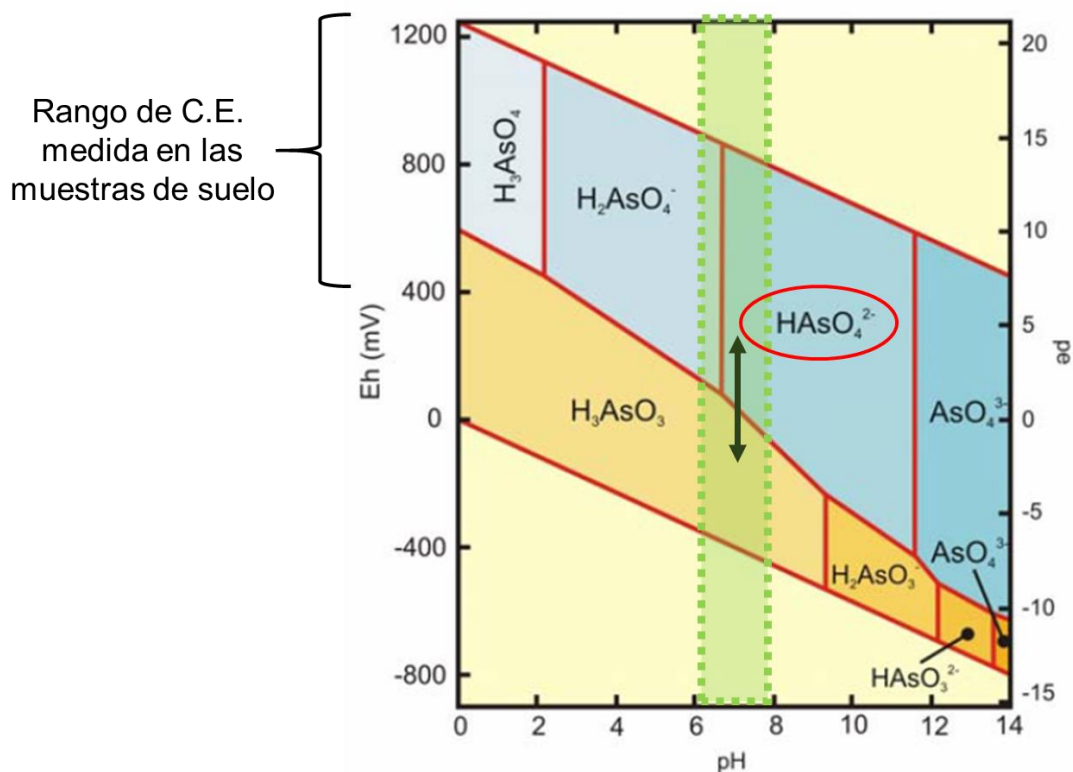


Figura 79. Diagrama de especies del arsénico (Brookins, 1988; Yan *et al.*, 2000).

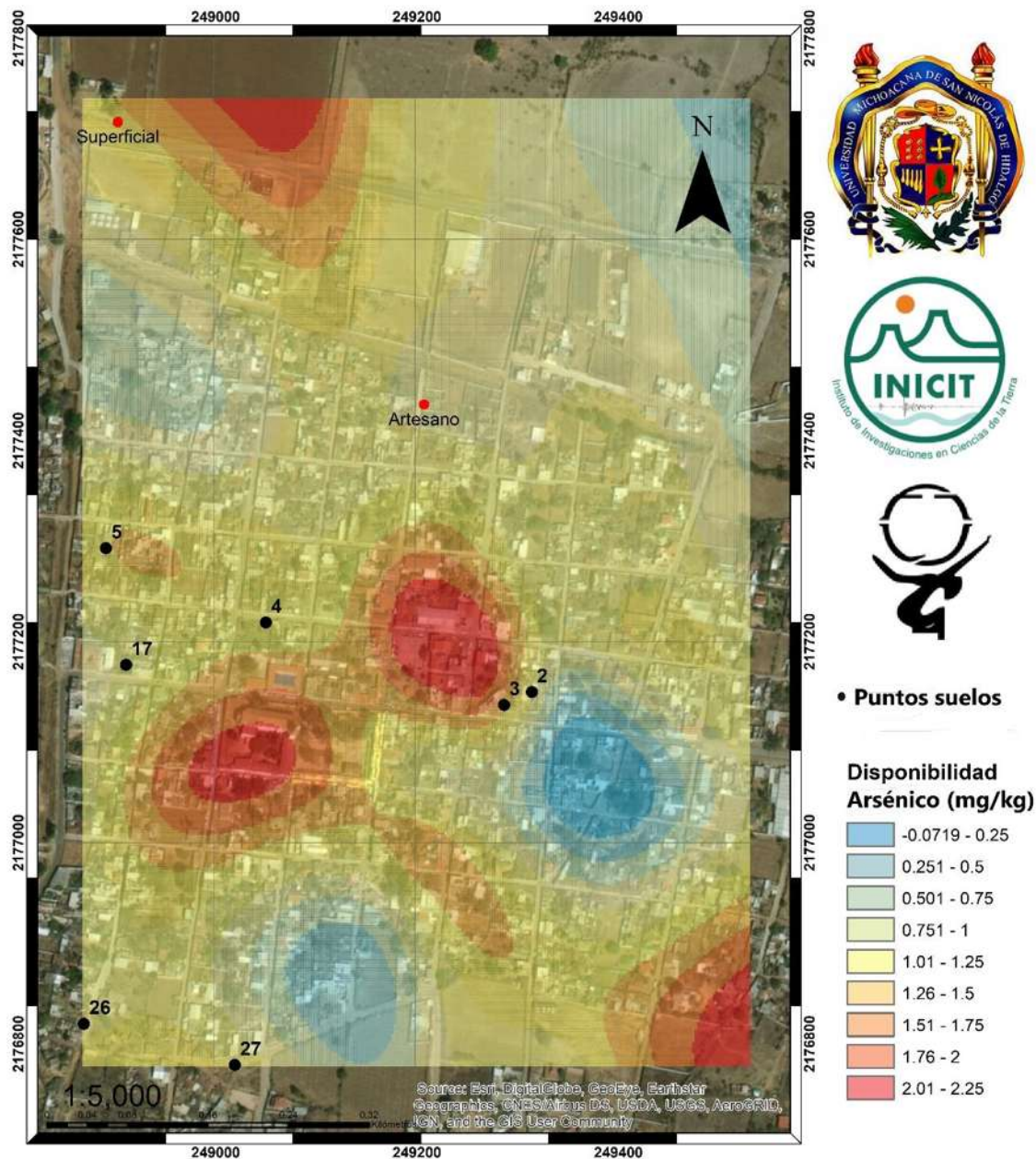


Figura 80. Mapa de distribución del arsénico en los suelos de la comunidad de Capula. Se indican los puntos que presentan las características del As disponible.

La Figura 80, indica la distribución del arsénico en las muestras de suelo, de las cuales las muestras 2, 3, 4, 5, 17, 26 y 27, señaladas con puntos negros, son las que cumplen las características para presentar el As disponible.

Es posible observar la presencia de dos zonas de alta concentración importantes, con dirección SO-NE, las cuales están separadas por el área que corresponde a la iglesia “Santiago Apóstol” de la comunidad, por lo que las mayores concentraciones de localizan en la zona centro.

Como se mencionó al principio, la alfarería es la principal y más importante actividad económica de Capula desde hace varias décadas. Gran parte de los habitantes cuenta con talleres que se ubican dentro de sus casas y los residuos de la actividad son desechados, ya sea en los patios de las mismas o en zonas cercanas a ellas.

Los puntos que se muestran en el mapa coinciden en que son áreas destinadas al desecho de las aguas utilizadas en el proceso de producción de piezas alfareras.

Los puntos 3, 4 y 5 son muestras obtenidas en los patios de las casas en las que se practica la alfarería y donde los residuos de la misma son depositados directamente al suelo, además de desechar piezas que se rompieron durante el proceso de cocción o posterior, algunas de las cuales ya están esmaltadas, recordando que la mayoría de los esmaltes utilizados contienen metales pesados.

El punto 2 es una muestra también obtenida de un patio, que si bien actualmente ya no practican la actividad, pues se optó por la construcción de una vecindad con patio en común, durante mucho tiempo fue un área destinada a la producción de piezas alfareras, pues debajo del área verde, se encontraban restos de las piezas trituradas y desechadas, muy similar a los puntos antes mencionados.

El punto 17 es un terreno baldío sin barda o alambrado para limitar su acceso. En él se han depositado durante mucho tiempo los residuos de grandes talleres alfareros ubicados a pocos metros y de los cuales no fue posible obtener una muestra de suelo, al igual que de otros más pequeños. El punto está rodeado tanto de desechos alfareros como de desechos urbanos.

Los últimos puntos 26 y 27 no son muestras de patios, sino muestras de áreas destinadas al desecho de los residuos alfareros fuera de las casas. En ellas se depositan tanto las aguas residuales directamente al suelo, como piezas trituradas y algunas esmaltadas.

Es importante recalcar que el que un metal traza presente altas concentraciones no implica que esté disponible en el ambiente, la disponibilidad depende de que el metal no este fuertemente adsorbido en el suelo como se explicó con anterioridad.

6. CONCLUSIÓN

6. Conclusión

Se realizó la comparación de los valores obtenidos de los parámetros físicos y químicos con los establecidos en los parámetros de control, indicando que las aguas subterráneas **no están contaminadas** o, en su defecto, muy poco contaminadas.

A partir de los parámetros físicos y químicos, se determinó el Índice de Calidad del Agua (ICA) para todas las muestras, obteniendo valores de ICA entre 51.88 y 65.75, lo que indica que son aguas **poco contaminadas y necesitan tratamiento**.

El pozo de extracción de agua subterránea con un **valor de ICA mayor** (65.7), corresponde al pozo Superficial, que a su vez es propiedad privada, utilizado únicamente para el consumo del ganado y riego.

El pozo de extracción de agua subterránea con un **valor de ICA menor** (51.8), corresponde al pozo **Artesano**, el cual se localiza dentro de la comunidad y es el más importante, pues la mayoría de los habitantes se abastece de él. Este pozo es el único que cuenta con un sistema de cloración.

Las descargas denominadas “Capula” y “Estancada” son aguas residuales con valores del ICA que indican que son **aguas altamente contaminadas** y que **no son aceptables para ninguna actividad**.

El análisis de calidad del agua a través del uso del **ICA es más efectivo que solamente comparar los parámetros o límites establecidos** en las Normas Oficiales Mexicanas, pues emplea los parámetros más indicativos de contaminación del agua, a los cuales se les asigna un peso o una ponderación.

Se obtuvieron las concentraciones de metales traza (**As, Cu, Zn**) en muestras de agua subterránea; de las cuales **ninguna rebasó los límites establecidos** en las Normas Oficiales Mexicanas.

Es importante resaltar que el **As fue el único metal traza encontrado en pozos de extracción de agua subterránea** Iratzio (0.002 mg/L), Buenavista (0.0028 mg/L) y Secundaria (0.0017 mg/L) pero **no rebasó las Normas Mexicanas**.

Se tiene una **relación inversa** con el oxígeno disuelto y el arsénico, lo que significa que **el oxígeno disuelto disminuye si la concentración de As aumenta**, lo cual indicaría la oxidación de alguna especie del As, lo que es indicativo de una **reactividad química en el ambiente** y por tanto un indicio de **disponibilidad**.

Las muestras de suelo analizadas varían de un valor de **pH de 6 a 7**, y la **conductividad eléctrica va de 400 a 2700 μ S/cm**.

La clase textural del suelo varía de franca a franco arenosa. Se encontró una irregularidad de los suelos en las viviendas, debido a que en muchas de ellas se utilizó un relleno que consistía en gran cantidad de arenas y gravas para la nivelación del terreno. Es por esto que se encontró un alto porcentaje de arena en las muestras.

Las muestras franco arcillosas presentes, corresponden a suelos ubicados en el extremo NO de la zona de estudio y **corresponde a viviendas donde no se practica la actividad artesanal**.

Considerando la granulometría de las partículas en los suelos, **la parte más superficial presenta un alto porcentaje de arenas y limos, ayudando a la rápida infiltración de líquidos**, ya sea naturales como agua de lluvia o residuales como aguas utilizadas en el trabajo artesanal.

Las concentraciones obtenidas de metales traza en las muestras de suelo **no rebasan los límites naturales** marcados en la literatura.

El único metal traza que mostró características para estar disponible en el ambiente es el As. Dentro de los **parámetros** analizados en la presente tesis aquellos **que permiten que el As esté disponible en el ambiente** son: **pH mayor a 7, conductividad eléctrica (C.E.) entre 400 y 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y suelos arenosos. Las muestras de suelos que cumplen estas características son: 2, 3, 4, 5, 17, 26 y 27.**

Posible anión del As (**HAsO_4^{2-}**) disponible.

Los puntos **3, 4 y 5** son muestras obtenidas de los **patios de las casas en las que se practica la alfarería** y donde los residuos de la misma son depositados directamente al suelo, además de desechar piezas que se rompieron durante el proceso de cocción o posterior. El punto **2** es una muestra obtenida de un patio de una vecindad que durante mucho tiempo **fue un área destinada a la producción de piezas alfareras**. El punto **17** es un terreno baldío sin barda o alambrado para limitar su acceso. En él se han depositado los residuos de grandes talleres alfareros, el punto **está rodeado tanto de desechos alfareros como de desechos urbanos**. Los puntos **26 y 27** son muestras de áreas destinadas al desecho de los residuos alfareros fuera de las casas, en ellas se depositan tanto las aguas residuales directamente al suelo, como piezas trituradas y algunas esmaltadas.

Si un metal traza presenta altas concentraciones no implica que esté disponible en el ambiente, **la disponibilidad depende de que el metal no este fuertemente adsorbido en el suelo.**

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro R. (2010). **Estudio de la movilidad y toxicidad de metales pesados y arsénico en agua y sedimentos del lago de Cuitzeo, Michoacán**. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de México.
- APHA; AWWA; WPCF. (1992). **Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales**. 17ª. Ed. Díaz de Santos. España.
- ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2005). **Cinc**. División de Toxicología ToxFAQs MT.
- Ayala, J.M., A. Cabrera, y A. J. Farfán. (1996). **Análisis de la disponibilidad de agua en la subcuenca de Cuitzeo**. En: Monografía del Foro de Análisis de la Problemática Ambiental del Estado de Michoacán. Cuenca del Lago de Cuitzeo. LXVLL Legislatura y U.M.S.N.H. México: 50-58.
- Baize, D. & Sterckeman, T. (2001). **Of the necessity of knowledge of the natural pedogeochemical background content in the evaluation of the contamination of soils by trace elements**. Science of the Total Environment, 264, 127-139.
- Ball, R., Church, R. (1980). **Water Quality Indexing And Scoring**. Journal Of The Enviromental Engineering Division. American Sociey of Civil Engineers.
- Barrenechea-Martel, A., (2013). **Aspectos físicos y químicos de la calidad del agua**. Manual I.
- Bautista, F. (1999). **Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados**. Universidad Autónoma de Yucatán. ISBN 968-7556-82-X
- Bourg, A.C.M. (1995). **Speciation of heavy metals in soils and groundwater and implications for their natural and provoked mobility**. In "Heavy Metals", W. Salomons, U. Förstner & P.Mader, eds. Springer-Verlag, Berlin, 19-31.
- Bowen, H.J.M. (1979). **Environmental chemistry of the elements**. Academic Press, London.
- Bowie, S.H.U. & Thornton (1985). **Environmental Geochemistry and Health**. Kluwer Academic Publ., Hingham. MA

- Boyle D.R., Turner R.J.W., Hall G.E.M. (1998). **Anomalous arsenic concentrations in groundwaters of an island community, Bowen Island, British Columbia.** Environ. Geochem and Health, 20, 199-212.
- Baize, D. & Sterckeman, T. (2001). **Of the necessity of knowledge of the natural pedogeochemical background content in the evaluation of the contamination of soils by trace elements.** Science of the Total Environment, 264, 127-139.
- Brookins,D.G.,(1988). **Eh-pH Diagrams for Geochemistry.** Springer-Verlag, Berlin.
- Buenrostro, O.; Bocco, G.; Bernache, G. (2001). **Urban Solid Waste Generation and Disposal in Mexico. A Case Study;** Waste Manage. Res. 19, 169-176.
- Cabrera-González, A., Medina-Orozco, L.E., Alcalá de Jesús, M., Sánchez-Espizona, J.F. y Ayala-Gómez, J. (2010). **Suelos.** En: Atlas de la cuenca del Lago de Cuitzeo: Análisis de su geografía y entorno socioambiental. UNAM; UMSNH. México
- Canadian Environmental Quality Guidelines (2003). Canadian Council of Ministres of the Environment (CCME), December,
- Casillas-Corona, M. (2016). **Metales pesados y su impacto en las enfermedades de la población humana del municipio de Copándaro, Michoacán.** Tesis. Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio. UMSNH.
- CNA (2004). **Indicadores de calidad del agua.**
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2001). **Estadísticas del agua en México.**
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2005). **Calidad del agua en México.**
- Covarrubias, S.A., Peña-Cabriales, J.J. (2017). **Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación.** Rev. Int. Contam. Ambie. 33 (Especial Biotecnología e ingeniería ambiental) 7-21, 2017 DOI: **10.20937/RICA.2017.33.esp01.01**
- Cruz-Marqueta, M. (2009). **Diversidad artesanal. Artesanías y medio ambiente.** FONART. IBN: 978-607—607-19-9.
- Cude, C.G. (2001). **Oregon water quality index: a tool for evaluating water quality management effectiveness.** Journalof the American Water Resources Association 37(1), 125-137.

- Custodio, E. y Llamas, M.R. (1983). **Hidrogeología subterránea**. Segunda Edición. Tomo I, pág.203.
- Delgado, I., Israde, I., Bautista, F., Goguitchaichvili, A., Márquez, C., Cejudo, R., Morales, J., González, I. (2015) **Metales pesados en suelos urbanos de Morelia, Michoacán: influencia del uso del suelo y del tipo de vialidad**. Revista Ciencia Nicolita #65.
- Díaz-Rodríguez. L. (2013). **Evaluación de la calidad en aguas y sedimentos del Río Grande de Morelia, Michoacán**. Tesis. Maestría en Ciencias de Ingeniería Civil. U.M.S.N.H.
- Dinius, SH., (1972). **Social accounting system for evaluating wáter resources**. Water Resources Research, vol. 8, no. 5, p. 1159-1177
- Dirección del Medio Ambiente y Ecología (2006). **Calidad del agua de los pozos en San Miguel de Allende**. Ecosystem Sciences Foundation.
- DOF. (1994). Norma Mexicana NOM-127-SSA1-1994. **Salud ambiental, agua para uso y consumo humano – Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización**. México.
- DOF. (1996a). Norma Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. **Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales**. México.
- DOF. (1996b). Norma Mexicana NOM-001-ECOL-1996. **Límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales en aguas y bienes nacionales**. México.
- DOF. (2000a). Norma Mexicana NMX-AA-093-SCFI-2000. **Análisis de agua: Determinación de la conductividad electrolítica**. Método de prueba. México.
- DOF. (2000b). Norma Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. **Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis**. México.
- DOF. (2000c). Norma Mexicana NOM-199-SSA1-2000. **Salud ambiental. Niveles de plomo en sangre y acciones como criterios para proteger la salud de la población expuesta no ocupacionalmente**. México.

- DOF. (2001a). Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001. **Análisis de agua - Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas** - Método de prueba. México.
- DOF. (2001b). Norma Mexicana. NMX-AA-012-SCFI-2001. **Análisis de agua: Determinación de Oxígeno Disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas**. Método de prueba. México.
- DOF. (2001c). Norma Mexicana. NMX-AA-045-SCFI-2001. **Análisis de agua: Determinación de color platino cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas**. Método de prueba. México.
- DOF. (2001d). Norma Mexicana. NMX-AA-072-SCFI-2001. **Análisis de agua: Determinación de Dureza Total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas**. Método de prueba. México.
- DOF. (2001e). Norma Mexicana. NMX-AA-073-SCFI-2001. **Análisis de agua: Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas**. Método de prueba. México.
- DOF. (2001f). Norma Mexicana. NMX-AA-079-SCFI-2001. **Análisis de agua: Determinación de nitratos totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas**. Método de prueba. México.
- DOF. (2001g). Norma Mexicana. NMX-AA-028-SCFI-2001. **Análisis de agua: Determinación de Demanda Bioquímica de Oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas**. Método de prueba. México.
- DOF. (2001h). Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001. **Análisis de agua: Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas**. Método de prueba. México.
- DOF. (2001i). Norma Mexicana NOM-023-SEMARNAT-2001. **Especificaciones técnicas que deberán contener la cartografía y la clasificación para la elaboración de los inventarios de suelos**. México.
- DOF. (2004). Norma Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. **Criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por**

arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. México.

DOF. (2006). Norma Mexicana NOM-041-SEMARNAT-2006. **Limites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible.** México.

DOF. (2011). Norma Oficial Mexicana NOM-159-SEMARNAT-2011. **Análisis de suelo: Requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre.** México.

DOF. (2014). Norma Mexicana. NMX-AA-074-SCFI-2014. **Análisis de agua: Medición del ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.** Método de prueba. México.

DOF. (2016). Norma Mexicana. NMX-AA-008-SCFI-2016. **Análisis de agua: Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.** Método de prueba. México.

Edmunds, W.M., Cook, J.M., Kinniburgh, D.G., Miles, D.L., Trafford, J.M. (1989) **.Trace element.** Occurrence in British. Groundwaters. Res. Report SD/89/3, British Geological, Survey, Keyworth.

Etchevers J. D. (1988). **Análisis químico de suelos y plantas.** Centro de Edafología. Colegio de Posgraduados, Chapingo, Estado de México. 803p

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2009). **Guía para la descripción de suelos.** Roma

FONART (2010), **Uso del plomo en la alfarería en México.** Fondo Nacional para el Fomento de las Artesanías (FONART) y Blacksmith Institute, de Mario Covarrubias Pérez y Daniel Estrada Sánchez: [http:// alfareria.org/sites/default/files/images/ InformePbAlfareria2010.pdf](http://alfareria.org/sites/default/files/images/InformePbAlfareria2010.pdf)

Föstner, U. (1987). **Changes in metal mobilities in aquatic and terrestrial cycles.** En "Metal Speciation, Separation, and Recovery", J.W.

- Galán, E. (2000). **The role of clay minerals in removing and immobilising heavy metals from contaminated soils.** En "Proceedings of the 1st Latin American Clay Conference", vol. 1, C. Gomes, ed. Funchal, 351-361.
- García-Martínez. R. (2007). **Determinación de metales pesados en la precipitación pluvial de una zona urbana (Ciudad de México) y de una zona rural (Rancho Viejo, Edo. De México).** Tesis. Doctorado en Ciencias. Física de la atmósfera. UNAM.
- García-Vargas, G.G., Andrade-Rubio, M., Rosales-González, M.G., Goytia-Acevedo, R., García-Arenas, G., Candelas-Rangel, L., Meza-Velázquez, R., Caravanos, J. (2007). **Contaminación por metales en suelos de la ciudad de Torreón, Coahuila, México.** Facultad de medicina, UJED.
- Garduño-Monroy, V.H., Rodríguez-Torres, G., Israde-Alcántara, I., Arreygue, E., Canuti, P., Chiesa, S. (1999). **Efectos del clima (El niño) en los fenómenos de fluencia de las fallas geológicas de la ciudad de Morelia.** GOS, Vol. No. 19, No. 2, Pág. 84-93.
- Garduño-Monroy V. H. y Israde-Alcántara I. (2010). **Geología. Capítulo 1. Características físicas. In: Atlas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo: Análisis de su Geografía y Entorno Socioambiental.** ISBN: 978-607-02-1830-9.
- Gómez-Tagle, A. (2008). **Variabilidad de las propiedades edáficas relacionadas con la infiltración y la conductividad hidráulica superficial en la cuenca de Cuitzeo.** Tesis doctoral. Instituto De Investigaciones Sobre Recursos Naturales. U.M.S.N.H.
- González, A., Cuevas, G., Vélez, C., Hernández, D. (2010). **Caracterización de suelos y evaluación del contenido de metales pesados en zonas urbanas del estado de Chihuahua.** Facultad de Zootecnia. UACH.
- Guzmán-Morales, A., Sánchez-Elías, S. y García-Nieblas, E. (2007). **Efecto de los residuos de una industria cerámica sobre la contaminación del suelo.** Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, Vol. 16. Universidad Agraria de La Habana, Fructuoso Rodríguez Pérez. La Habana, Cuba.
- Illescas, J.A.; Llamas, J.; Higuera, P.; y Del Barrio, S.; (1996). **Caracterización geoquímica de partículas sedimentarias en una población urbana e industrial: el caso de Puertollano (Ciudad Real).**

- INEGI. (1979). **Carta Edafológica E14A23, Morelia**. En. INEGI, Dirección General de Geografía, Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI. (1979). **Carta de Cobertura y Uso de suelo E14A23, Morelia**. En. INEGI, Dirección General de Geografía, Aguascalientes, Ags., México.
- Israde-Alcántara, I., Rodríguez, R., Silva, T., Carrillo-Chávez, A., García, A. (1999). **El tiradero de Morelia y sus lixiviados**. Rev. Vinculación. Ensayos. En Michoacán, Agriculturización, uso del agua e impacto social. Editorial UMSNH. Edición especial de ensayos No.6.
- Israde-Alcántara, I., Buenrostro-Delgado, O., Carrillo-Chávez, A. (2012). **Geological Characterization and Enviromental Implications of the Placement of the Morelia Dump, Michoacán, Central Mexico**. Journal of the Air & Waste Management Association, 55:6, 755-764, DOI: 10.1080/10473289.2005.10464665
- Jiménez B. (1999). **Índice de disponibilidad del agua en base a su calidad y cantidad**. Conferencias internacionales de manejo de fuentes de agua en ciudades áridas, Muscat, Oman, Marzo.
- Jiménez, B. (2001). **La Contaminación Ambiental en México**. Causas, efectos y tecnología, Instituto de Ingeniería UNAM Capitulo 1.
- Jiménez-Cisneros, B.E. (2005). **La contaminación ambiental en México: causas efectos y tecnología apropiada**. Editorial LIMUSA, S.A. de C.V. México. ISBN 968-18-6042-X.
- Jiménez de Grado, M., De Miguel García, E.; Llamas Borrajo, J. F.; Chacón Oreja, E.; Mazadiego Martínez, L.F.; Jiménez Álvarez, M.; Del Barrio Martin, S.; (1997). **Caracterización de las fuentes antrópicas de elementos traza en suelos urbanos**. Elementos trazadores de procesos urbanos. Geogaceta, 21, 147-150.
- Kabata-Pedías A. (2011). **Trace elements in soils and plants**. Fourth edition CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business. Disponible en http://www.petronet.ir/documents/10180/2323242/Trace_Elements_in_Soils_and_Plants

- Karma A. (1993). **Chemical properties of organic soils**. Soil sampling and methods of analysis. Martin R. Carter Editor. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers. Pp. 459-471
- Klemm, D. J., Lewis, P. A., Fulk, F. & Lazorchak, J. M. (1990). **Macroinvertebrate Field and Laboratory Methods for Evaluating the Biological Integrity of Surface Waters**. US Environment Protection Agency, Cincinnati, Ohio, USA.
- Larson, W.E. y Pierce, F.J. (1994). **The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management**. Pages 37-51 In: J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezedick, and B.A. Stewart, eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Soil Sci Soc. Am. Special Pub. No. 35, Am. Soc. Agron., Madison, Wisc. U.S.A.
- López, E., G. Bocco, M. Mendoza, A. Velázquez, y J. Rogelio Aguirre-Rivera. (2006). **Peasant emigration and land-use change at the watershed level: A GIS-based approach in Central Mexico**. Agricultural Systems.
- Martínez-Trejo, J.A. (2017). **Análisis bianual de hidrocarburos en el anillo de cenotes, Yucatán**. Tesis. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. UNAM.
- Mijangos-Ávila, J. (2014). **Estudio de la rehabilitación del parque Fundidora área de suelo contaminado con metales totales y lixiviables**. Tesina. Especialidad en Sanitaria. UNAM.
- Nasirian, M. (2007). **A new water quality index for environmental contamination contributed by mineral processing: a case study of amang (tin tailing) processing activity**. Journal of applied sciences 7(20), 2977-2987.
- Newman, M.C., Jagoe, C.H. (1994). **Ligands and the bioavailability of metals in aquatic environments**. In: Hamelink, J.L., Landrum, P.F., Bergman, H.L., Benson, W.H. (Eds.), Bioavailability: Physical, Chemical, and Biological Interactions. CRC Press.
- Oremland, R.S., Stolz, J.F., 2003. The ecology of arsenic. Science.
- Noyola, L., (2017). **El plomo en la alfarería poblana**. Elementos (106, 11-20). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- OMS, Organización Mundial de la Salud (2011). **Guías sobre la calidad del agua para consumo humano**.

- Organista-Mota, R. (2017). **Estudio de calidad de agua subterránea y su relación con la salud pública en la región Capula-Coíntzio**. Tesis. Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio. UMSNH.
- Orozco Carmen B. (2003). **Contaminación ambiental: una visión química**. Thompson. España.
- Páez S. A. (2008). **Evaluación de la concentración de arsénico y calidad del agua subterránea en función de su manejo en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán**. Facultad de biología. U.M.S.N.H.
- Panduro, M., Hernández, L., López, A., Murillo, A., Díaz, J., y Real, J. (2014). **Evaluación de la calidad del agua ante la enfermedad renal crónica en la Zona Oriente de Michoacán, México**. Tlamati, 5(3). 22-32.
- PNUMA, Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2002). **Principales reservas hídricas en el mundo**.
- Prati, L, R. Pavanello, and F.Pesarin (1971). **Assessment of surface water quality by single index pollution**, Water Res., 5., 741-751.
- Rigola. L.M. (1990). **Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales**. Editorial Alfaomega. 33 y 34.
- Rocha-Castro, E. (2000). **Principios básicos de espectrometría**. Editorial UACh, México.
- SAGARPA, INIFAP, (2011). **La labranza de conservación de los indicadores de calidad de suelo en el valle de Morelia-Queréndaro, Michoacán**. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro. Uruapan, Mich. Folleto Técnico Núm. 29. ISBN: 978-607-425-719-9.
- Saxton, K. E., W. Rawls, J. S. Romberger, y R. I. Papendick. (1986). **Estimating generalized soil-water characteristics from texture**. Soil Sci Soc Am J 50:1031-1036
- Stoner J. D. (1978). **Water Quality Indices for Specific Water Uses U.S.** Geological Survey Circular, 770.
- SEMARNAT. Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua. (1999). **Indicadores de calidad de agua**. México

- SEMARNAT, Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, Octubre 2005.
- SEMARNAT, Comisión Nacional del Agua, Estadísticas del Agua en México, 1a edición, CNA, México, 2007.
- SEMARNAT, Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, Octubre 2010. **Fuentes de contaminación en México.**
- Siebe, C., Jahn, R., Stahr, K. (1996). **Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo.** Publicación Especial 4. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.
- Siegel, F. R. (2002): **Environmental geochemistry of potentially toxic metals.** Springer.
- Sierra A.I., Morante Z.S., Pérez Q. D. (2007). **Experimentación en Química Analítica,** Editorial DYKINSON. 91.
- Skoog, J., Holler, F.J. (1998). **Principios de análisis instrumental.** 5° ed-; McGraw-Hill.
- Silva-Mora, L. (1979). **Contribution a la cannaissance de Laxe Transmexicain: etude geologique et petrologique des laves du Michoacán Oriental.** PHD tesis, Universidad Aix-Marsella III.
- Smedley, P. y Kinniburgh, D. (2002). **A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters.** Applied Geochemistry, 17: 517-568.
- Sposito, G. (1989). **The chemistry of soils.** Oxford Univ. Press.
- Soil Science Society of America (SSSA), (2011). **Glossary of Soil Science Terms 2011.**
- Vázquez A. A. y Bautista N. (1993). **Guía para interpretar el análisis químico de suelo y agua.** Departamento de Suelos. Universidad Autónoma de Chapingo. México.
- Verduzco-Cedeño, L.A. (2010). **Evaluación de la contaminación al acuífero, en la región Morelia-Capula, causada por el impacto de la infiltración de lixiviados generados por el basurero municipal de Morelia.** Tesis. Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio. UMSNH.
- Villalobos-Castañeda B., R. Alfaro-Cuevas, R. Cortés-Martínez, V. Martínez-Miranda y L. Márquez-Benavides. (2010). **Distribution and Partitioning of iron, zinc, and arsenic in surface sediments in the grande river mouth to Cuitzeo lake, México.**

Springer Science. Environ Monit Assess 2010. 166:331-346. DOI: 10.1007/10661-009-1005-7

Waterlogic (2016). **¿Qué factores determinan la calidad del agua?** Educación sobre el agua. México.

Welch, A.H., Westjohn, D.B., Helsel, D.R., Wanty, R.B., (2000). **Arsenic in ground water of the United States: occurrence and geochemistry.** Ground Water 38, 589-604.

Yan, X., P., Kerrich, R., Hendry, M.J. (2000). **Distribution of arsenic(III), arsenic(V) and total inorganic arsenic in pore-waters from a thick till and clay-rich aquitard sequence, Saskatchewan, Canada.** Geochim. Cosmochim. Acta, 64, 2637-2648.

8. ANEXOS

Anexo 1.

Tabla 27. Coordenadas geográficas de los pozos de extracción de agua subterránea muestreados.

Clave	Localidad	Coordenadas			Uso	Nombre
		X	Y	Z		
P1-A	Capula	0249209	2177436	2094	Potable	Artesanos
P2-A	Capula	0247834	2179963	2102	Potable	Campos cultivo
P3-A	Capula	0248905	2177717	2098	Potable	Superficial
P4-A	Col. 2 de Octubre	0250146	2176999	2095	Potable	Secundaria
P5-A	Capula	0249698	2177119	2097	Potable	Buenavista
P6-A	Iratzio	0247521	2175715	2155	Potable	Iratzio

Tabla 28. Coordenadas geográficas de las descargas de aguas residuales.

Clave	Localidad	Coordenadas		
		X	Y	Z
AR-1	Capula	0249767	2177338	2097
AR-2	Col. 2 de Octubre	0250070	2177026	2093

Tabla 29. Coordenadas geográficas de las muestras de suelo muestreados.

Clave	Localidad	Coordenadas		
		X	Y	Z
P1	Capula	0249287	2177139	2095
P2	Capula	0249316	2177150	2094
P3	Capula	0249272	2177098	2100

P4	Capula	0249052	2177219	2096
P5	Capula	0248893	2177293	2098
P6	Capula	0248965	2177389	2101
P7	Capula	0249207	2177403	2101
P8	Capula	0249267	2177355	2096
P9	Capula	0249407	2177360	2090
P10	Capula	0249507	2177274	2095
P11	Capula	0249040	2177304	2096
P12	Capula	0249085	2177501	2091
P13	Capula	0248878	2177271	2093
P14	Capula	0249408	2177176	2088
P15	Capula	0249532	2177191	2093
P16	Capula	0249141	2177128	2097
P17	Capula	0248913	2177177	2100
P18	Capula	0248984	2177049	2097
P19	Capula	0249210	2177030	2096
P20	Capula	0249207	2177020	2093
P21	Capula	0249333	2177023	2097
P22	Capula	0249493	2176932	2096
P23	Capula	0249299	2176946	2089
P24	Capula	0249118	2177009	2091
P25	Capula	0248888	2177738	2100
P26	Capula	0248871	2176820	2109
P27	Capula	0249021	2176779	2102
P28	Capula	0249216	2176904	2098
P29	Capula	0249174	2176964	2088
P30	Capula	0249398	2177044	2095

