

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E  
INVESTIGACIÓN**



**DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO COMO  
AGENTES CONTAMINANTES PRESENTES EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA  
CIUDAD INDUSTRIAL DE LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO**

**TESIS**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PRESENTA**

**ING. REYNALDO MAURICIO REYES MEDINA**

**SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L.**

**JULIO, 2021**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
E INVESTIGACIÓN**



**TESIS**

**DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO COMO  
AGENTES CONTAMINANTES PRESENTES EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA  
CIUDAD INDUSTRIAL DE LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO**

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN  
CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PRESENTA**

**ING. REYNALDO MAUCIRIO REYES MEDINA**

**Vo. Bo.**

---

**Dr. Héctor de León Gómez  
Director de Tesis**

**SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L.**

**JULIO, 2021**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
E INVESTIGACIÓN**



**TESIS**

**DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO COMO  
AGENTES CONTAMINANTES PRESENTES EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA  
CIUDAD INDUSTRIAL DE LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO**

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN  
CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PRESENTA**

**ING. REYNALDO MAURICIO REYES MEDINA**

**Vo. Bo.**

**Comité de Revisión de Tesis**

---

**Dr. Héctor de León Gómez  
Director de Tesis**

---

**Dr. Arquímedes Cruz López  
Co-Director de Tesis**

---

**Dr. Antonio Cardona Benavides  
Asesor externo - U.A.S.L.P.**

**SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L.**

**JULIO, 2021**

**DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO COMO  
AGENTES CONTAMINANTES PRESENTES EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA  
CIUDAD INDUSTRIAL DE LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO**

**Aprobación de la tesis**

**DR. HÉCTOR DE LEÓN GÓMEZ**

---

PRESIDENTE

**DR. ARQUÍMEDES CRUZ LÓPEZ**

---

SECRETARIO

**DR. ANTONIO CARDONA BENAVIDES**

---

VOCAL

**DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL**

---

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

<b>CONTENIDO</b>	<b>PÁGINA</b>
ÍNDICE DE FIGURAS	1
ÍNDICE DE TABLAS	4
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
<b>Capítulo 1: INTRODUCCIÓN</b>	<b>8</b>
1.1 Antecedentes	9
1.1.1 Estudios previos generales	9
1.1.2 Pasivos ambientales	12
1.1.3 Contaminación por compuestos orgánicos volátiles (COV): benceno, tolueno, etilbenceno, m/p – xileno y/o – xileno (BTEX).	13
1.1.4 Antecedentes en la zona de estudio	15
1.1.5 Justificación	16
1.2 Hipótesis	17
1.3 Objetivos	18
1.3.1 Objetivo general	18
1.3.2 Objetivos específicos	18
<b>Capítulo 2: GENERALIDADES</b>	<b>20</b>
2.1 Descripción del área de estudio	20
2.2 Fisiografía	20
2.3 Suelos	21
2.4 Clima y vegetación	21
2.5 Precipitación	22
2.6 Temperatura	22
2.7 Hidrología	23
2.8 Hidrogeología	23
2.9 Geología	24
2.9.1 Geología regional	24
2.9.2 Geología local	26
2.10 Estratigrafía	26
2.10.1 Formación Méndez	26
2.10.2 Depósitos Terciarios	27
2.10.3 Depósitos Cuaternarios	27
2.11 Geología estructural	28
<b>Capítulo 3: MARCO TEÓRICO</b>	<b>30</b>
3.1 Geología	30
3.1.1 Fracturas	31
3.1.2 Discordancias estratigráficas	35
3.1.3 Terrazas	35
3.2 Hidrología	36
3.2.1 Ciclo hidrológico	37

3.3 Hidrogeología	37
3.3.1 Acuífero	38
3.3.2 Tipos de acuífero	38
3.3.3 Conductividad hidráulica (K)	40
3.4 Química del agua	40
3.4.1 Petróleo	41
3.4.1.2 Clasificación del petróleo	42
3.4.2 Hidrocarburos	43
3.4.2.1 Hidrocarburos totales policíclicos (HTP)	43
3.4.2.2 Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)	43
3.4.2.3 Impactos ambientales en agua superficial y subterránea causados por derrames de hidrocarburos	43
3.4.3 Compuestos orgánicos volátiles (COV): benceno, tolueno, etilbenceno, m/p – xileno y o – xileno (BTEX).	45
3.4.3.1 Características, usos, daños a la salud y efectos ambientales del benceno, tolueno, etilbenceno, m/p – xileno y o – xileno (BTEX).	46
3.4.4 Gasolina	49
3.5 Cromatografía de gases	49
3.5.1 Cromatógrafo de gases	50
3.5.2 Sistemas de inyección de muestra	51
3.5.3 Inyectores para columnas	51
3.5.4 Detector de ionización de llama (FID)	51
<b>Capítulo 4: METODOLOGÍA</b>	54
4.1 Análisis bibliográfico	54
4.2 Delimitación del área de estudio	54
4.3 Caracterización geológica	54
4.3.1 Recorridos en campo	54
4.3.2 Cartografía geológica	55
4.4 Caracterización Hidrogeológica	56
4.4.1 Ubicación de aprovechamientos hidráulicos	56
4.4.2 Cartas piezométricas	58
4.5 Caracterización Química del Agua	60
4.5.1 Muestreo de agua	60
4.5.2 Toma de muestras	61
4.5.3 Determinación de parámetros fisicoquímicos	66
4.5.3.1 Determinación de parámetros fisicoquímicos in situ	66
4.5.3.1.1 Conductividad eléctrica	66
4.5.3.1.2 Temperatura	67
4.5.3.2 Determinación de parámetros fisicoquímicos en laboratorio	67

4.5.3.2.1	Potencial de Hidrógeno (pH) y temperatura	68
4.5.3.2.2	Sólidos Totales (ST)	69
4.5.3.2.3	Sólidos Totales Volátiles (STV)	70
4.5.3.2.4	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	71
4.5.3.2.5	Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)	73
4.5.3.2.6	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	73
4.5.3.2.7	Iones (aniones)	75
4.5.3.2.7.1	Alcalinidad Total (Ak) como CaCO <sub>3</sub>	75
4.5.3.2.7.2	Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	77
4.5.3.2.7.3	Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	78
4.5.3.2.7.4	Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	81
4.5.3.2.7.5	Fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	83
4.5.3.2.7.6	Nitrógeno Total (NT)	84
4.5.3.2.8	Iones (cationes)	86
4.5.3.2.9	Determinación de COV BTEX	87
4.5.3.2.9.1	Condiciones del cromatógrafo	89
4.5.3.2.9.2	Estándares químicos y cuantificación	90
<b>Capítulo 5: RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>		94
5.1	Geología	94
5.1.1	Geología estructural	102
5.2	Hidrogeología	106
5.2.1	Cartas piezométricas	106
5.3	Química del agua	111
5.3.1	Parámetros fisicoquímicos in situ	111
5.3.1.1	Conductividad eléctrica	111
5.3.1.2	Temperatura	113
5.3.2	Parámetros fisicoquímicos en laboratorio	113
5.3.2.1	Potencial de Hidrógeno (pH)	114
5.3.2.2	Sólidos Totales (ST)	115
5.3.2.3	Sólidos Totales Volátiles (STV)	116
5.3.2.4	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	117
5.3.2.5	Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)	117
5.3.2.6	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	118
5.3.2.7	Iones mayoritarios	119
5.3.2.7.1	Fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	119
5.3.2.7.2	Nitrógeno Total (NT)	121
5.3.2.7.3	Balance de neutralidad	122
5.3.2.7.3.1	Valoración de resultados	122
5.3.2.7.3.2	Familias de agua	123
5.3.2.7.3.3	Diagrama de Piper	123
5.3.2.7.4	Determinación de BTEX	125

<b>Capítulo 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	135
6.1 Conclusiones	135
6.2 Recomendaciones	137
BIBLIOGRAFÍA	138

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. El agua en el mundo. (Comisión del Agua del Estado de México, 2019).	8
Figura 2. Movilidad del hidrocarburo en el agua subterránea (Logeshwaran et al., 2018).	10
Figura 3. Sitios contaminados por emergencias ambientales según responsables involucrados, 2008 – 2015 (PROFEPA 2016).	14
Figura 4. Contaminantes involucrados en emergencias ambientales, 2008 – 2015 (PROFEPA 2016).	15
Figura 5. Localización del área de estudio. (Elaboración propia, con imagen de Google Earth, 2021).	20
Figura 6. Estación Climatológica: Camacho (19035), Linares, Nuevo León, México. Promedio de precipitación mensual, período 1924 – 2021 (CONAGUA, 2021).	22
Figura 7. Estación Climatológica: Camacho (19035), Linares, Nuevo León, México. Promedio de temperatura mensual, período 1924 – 2021 (CONAGUA, 2021).	23
Figura 8. Columna estratigráfica de la Sierra Madre Oriental (Michalzik, 1988).	25
Figura 9. Proceso del Ciclo Hidrológico (Aranda, 1984).	37
Figura 10. a) Acuífero de poros, b) Acuífero de grietas, c) Acuífero kárstico. (Modificado de Werner, 1996).	39
Figura 11. Diagrama metodológico en general.	54
Figura 12. Río Camacho (2020).	56
Figura 13. Aprovechamientos hidráulicos en zona de estudio. (Elaboración propia, con imagen de Google Earth, 2021).	57
Figura 14. GPS Marca GARMIN - OREGON 450.	58
Figura 15. Sonda Solinst – TLC: Temperatura, Nivel, Conductividad, Modelo 107.	59
Figura 16. Medición de niveles estáticos, 2021.	59
Figura 17. Toma de muestra con base a la NOM 014-SSA1-1993.	62
Figura 18. Muestras de agua subterránea tomadas en campo para análisis de laboratorio, 2020.	66
Figura 19. Potenciómetro marca Thermo SCIENTIFICTM ORIONTM.	67
Figura 20. Horno Thermo SCIENTIFICTM Heratherm OGS180 General Lab Oven – Gravity.	70
Figura 21. Balanza analítica 220G* 0.0001G, modelo PIONEER, marca OHAUS.	70
Figura 22. Mufla LINDBERG BLUE M Thermo SCIENTIFICTM.	71
Figura 23. Procedimiento para la identificación de SST.	72
Figura 24. Digestor modelo DRB 200® Marca Hach®.	75
Figura 25. Espectrofotómetro UV-visible LAMBDA™ 365, Marca PerkiElmer®.	75
Figura 26. Muestras de agua subterránea posterior a la adición de la disolución digestora y la disolución de $\text{Ag}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{SO}_4$ .	75
Figura 27. Adición de la solución de $\text{H}_2\text{SO}_4$ (0,1 N) a la muestra de agua subterránea para su reacción.	76
Figura 28. Cambio de coloración amarillento a rojizo al reaccionar el $\text{H}_2\text{SO}_4$ con la muestra.	77

Figura 29. Cambio de coloración de amarillo a amarillo rojizo al reaccionar el $\text{AgNO}_3$ con la muestra.	78
Figura 30. Análisis de nitratos en muestras de agua subterránea.	81
Figura 31. Soluciones con diferente concentración para elaborar la curva de calibración de sulfatos.	83
Figura 32. Reposo de muestras de agua subterránea con 10 mL de disolución vanado-molibdato aforadas a 50 mL con agua destilada.	84
Figura 33. Toma de una alícuota de 2 mL del reactivo de hidróxido para ser depositado en los tubos del reactivo ácido.	85
Figura 34. Muestras de Nitrógeno Total colocadas para su digestión en el Digestor modelo DRB 200® Marca Hach®.	85
Figura 35. Espectrómetro de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), marca Thermo SCIENTIFIC™, modelo iCAP 7400 Duo.	86
Figura 36. Cromatógrafo de gases marca Agilent modelo GC 7820 <sup>a</sup> .	88
Figura 37. Formas de inyección de analitos al cromatógrafo de gases. (Elaboración propia).	88
Figura 38. Columna capilar de sílice marca Supelco, No. 65233-03A (L x I.D. 30 m x 0.25 mm, df 0.25 $\mu\text{m}$ ).	89
Figura 39. Método experimental gráfico.	89
Figura 40. Estándar Analítico en DMSO, 1 mg.mL <sup>-1</sup> (Sigma Aldrich, Catálogo No.:43728-10X1ML).	90
Figura 41. Curva de calibración para benceno.	91
Figura 42. Curva de calibración para tolueno.	92
Figura 43. Fracturamiento tipo “lápiz” en lutita Méndez altamente intemperizada.	95
Figura 44. Lutitas pertenecientes a la Formación Méndez altamente intemperizadas.	96
Figura 45a. Bloques de areniscas en la parte alta de El Cerrito, con espesor de 1.50 m.	97
Figura 45b. Bloques de areniscas intercaladas con lutitas altamente intemperizadas, mostrando una estratificación semi-horizontal.	97
Figura 46. Lutita altamente fracturada, presenta estrías producto del desplazamiento y fricción de la roca.	98
Figura 47. Sedimentos de la terraza 1 poco consolidados intercalados con material arcilloso.	99
Figura 48. Terraza 2, presenta gran actividad biológica.	100
Figura 49. Sedimentos aluviales, terraza más joven, actualmente sigue recibiendo depositación de sedimentos a partir de material transportado por el cauce del río Camacho.	101
Figura 50. Interacción entre la T2 y los sedimentos aluviales que permite una buena relación río-acuífero.	102
Figura 51. Fracturamiento predominante “ac” y “bc” en lutita Méndez.	103
Figura 52. Familias de fracturas presentes en la zona de estudio.	104
Figura 53. Carta geológica – estructural del área de estudio (modificada de PAICYT 2006).	105

Figura 54. Carta piezométrica equivalente al mes de agosto 2020.	107
Figura 55. Carta piezométrica equivalente al mes de noviembre 2020.	108
Figura 56. Carta piezométrica equivalente al mes de febrero 2021.	109
Figura 57. Carta piezométrica equivalente al mes de mayo 2021.	110
Figura 58. Resultado del promedio de las 4 mediciones tomada de conductividad eléctrica a los aprovechamientos hidráulicos en campo en diferente temporada.	112
Figura 59. Resultado del promedio de las 4 mediciones tomada de temperatura a los aprovechamientos hidráulicos en campo en diferente temporada.	113
Figura 60. Resultados de pH obtenidos a partir de las muestras recolectadas de agua subterránea.	114
Figura 61. Resultados de ST obtenidos a partir de las muestras recolectadas de agua subterránea.	115
Figura 62. Resultados de STV obtenidos a partir de las muestras recolectadas de agua subterránea.	116
Figura 63. Resultados de SST obtenidos a partir de las muestras recolectadas de agua subterránea.	117
Figura 64. Resultados de DQO obtenidos a partir de las muestras recolectadas de agua subterránea.	119
Figura 65. Resultados de $\text{PO}_4^{3-}$ obtenidos a partir de las muestras recolectadas de agua subterránea.	120
Figura 66. Resultados de NT obtenidos a partir de las muestras recolectadas de agua subterránea.	121
Figura 67. Representación de los porcentajes de error considerados en el balance de neutralidad.	123
Figura 68. Diagrama de Piper con nomenclatura que muestra la clasificación de familias y facie hidrogeoquímica correspondiente al muestreo en temporada de sequía.	124
Figura 69. Resultado de las concentraciones de benceno en las muestras de agua subterránea.	127
Figura 70. Resultado de las concentraciones de tolueno en las muestras de agua subterránea.	128
Figura 71. Concentración en por ciento de BTEX en la gasolina.	129
Figura 72. Concentración en por ciento de cada COV BTEX en la gasolina proveniente de PEMEX.	130
Figura 73. Transporte en rocas fracturadas porosas.	132
Figura 74. Infiltración del y movilización del contaminante a través de un medio fracturado. (Elaboración propia).	133

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos generales de los aprovechamientos hidráulicos dentro de la zona de estudio.	57
Tabla 2. Datos necesarios para la elaboración de una carta piezométrica (mediciones tomadas en temporada de sequía – noviembre 2020).	60
Tabla 3. Toma de muestras de los diferentes aprovechamientos hidráulicos con base en la NOM 014-SSA1-1993.	63
Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos cuantificados en las muestras de agua, métodos de determinación y Normas Oficiales Mexicanas vigentes.	68
Tabla 5. Condiciones cromatográficas para la detección de COV BTEX.	90
Tabla 6. Tiempos de retención de los COV BTEX empleando una columna capilar de sílice.	91
Tabla 7, descripción de las aperturas en base a su separación (tomado de Barton et al., 1978).	104
Tabla 8. Clasificación de aguas naturales por su conductividad eléctrica de acuerdo a Gómez (2018).	112
Tabla 9. Resultados de porcentaje de error del balance de electroneutralidad.	122
Tabla 10. Clasificación de Piper en agua subterránea.	125
Tabla 11. Características de los compuestos benceno, tolueno, etilbenceno y 3. isómeros de xilenos (modificada de Christensen & Elton, 1996).	126
Tabla 12. Límites Máximos Permisibles para BTEX.	127
Tabla 13, COV BTEX presentes en gasolinas mexicanas.	129

## RESUMEN

La contaminación del agua subterránea es un gran problema ambiental, tanto actividades naturales como antropogénicas han generado un impacto ambiental en ellas. El objetivo del presente trabajo consistió en la evaluación del impacto que están teniendo la planta de rebombeo #5 y la estación de servicio #4003, ambas pertenecientes a PEMEX, se evaluó la presencia de contaminantes derivados del petróleo, específicamente compuestos orgánicos volátiles (COV) BTEX presentes en el agua subterránea, para la identificación de dichos contaminantes se implementaron métodos geológicos, hidrogeológicos y análisis fisicoquímicos. Para la identificación del medio geológico presente en la zona de estudio se realizó trabajo de campo y de gabinete, a través de cartografías geológicas fue posible identificar el medio rocoso existente en la zona y así poder correlacionarlo con las direcciones del agua subterránea. Se identificó la Formación Méndez, así como también se identificaron depósitos Terciarios, Cuaternarios y las terrazas que se encuentran sobre el lecho del río Camacho, las cuales son, la terraza 1, 2 y sedimentos aluviales. Las estructuras existente presentan una orientación general al NW-SE, que concuerda con el tren estructural de la Sierra Madre Oriental (SMO) y con las direcciones de flujo de agua subterránea, dichas estructuras se encuentran cortadas por un sistema de fracturamiento del tipo “ac” y de menor magnitud un fracturamiento del tipo “bc”. Con base a las mediciones tomadas de los pozos en diferente temporada se realizaron las cartas piezométricas correspondientes, las cuales determinaron un flujo preferencial del agua subterránea con dirección de noreste a sureste. Así mismo, se realizó un muestreo para la determinación de los parámetros fisicoquímicos correspondientes al igual que la identificación y cuantificación de COV BTEX, lo cual fue llevado a cabo en laboratorio mediante la técnica de cromatografía de gases con detector de ionización de llama (FID). Los resultados obtenidos de BTEX indicaron gran presencia del compuesto benceno y del tolueno, los resultados para benceno oscilaron de 0.84 a 2.77 mg/L y para tolueno de 1.06 a 4.90 mg/L, los cuales se encontraron sobrepasando los límites máximos permisibles (LMP) de diferentes normativas, tanto nacionales como internacionales. Con esto, se puede concluir que ambas plantas pertenecientes a PEMEX se encuentran contaminando las aguas subterráneas de la ciudad industrial de Linares, N.L. México, así como sus alrededores.

## **ABSTRACT**

Groundwater contamination is a major environmental problem, both natural and anthropogenic activities have generated an environmental impact on them. The objective of the present investigation consisted of evaluating the impact of the re-pumping plant #5 and service station #4003, both belonging to PEMEX. The presence of petroleum-derived contaminants, specifically volatile organic compounds (VOCs) BTEX present in groundwater, was evaluated by geological, hydrogeological methods and physicochemical analysis to identify these contaminants. To identify the geological environment present in the study area, field and office work was carried out, through geological cartographies it was possible to identify the existing rocky environment in the study area and thus be able to correlate it with the directions of groundwater. The Méndez Formation was identified, which is found throughout the study area, as well as Tertiary and Quaternary deposits and the terraces found on the Camacho riverbed, which are terrace 1, 2 and alluvial sediments. The existing structures present a general NW-SE orientation, which is consistent with the Sierra Madre Oriental (SMO) structural train and groundwater flow directions, these structures are cut by an "ac" type fracturing system and a smaller "bc" type fracturing system. Based on the measurements taken from the wells in different seasons, the corresponding piezometric charts were made, which determined a preferential groundwater flow in a northeast to southeast direction. Sampling was also performed to determine the corresponding physicochemical parameters as well as the identification and quantification of VOC BTEX, which was carried out in the laboratory using the gas chromatography technique with flame ionization detector (FID). The results obtained from BTEX indicated a high presence of the compounds benzene and toluene, the results for benzene ranged from 0.84 to 2.77 mg/L and for toluene from 1.06 to 4.90 mg/L, which were found to exceed the maximum permissible limits (MPL) of different regulations, both national and international. With this, it can be concluded that both plants belonging to PEMEX are contaminating the groundwater of the industrial city of Linares, N.L. Mexico, as well as its surroundings.

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico en el siglo XXI representa un paradigma para la sobrevivencia del ser humano, atendiendo a un ritmo acelerado la demanda global que en los últimos años ha aumentado considerablemente. Como tal, es un recurso natural limitado que por lo tanto resulta ser escaso, estimado y sobrevalorado (Figura 1). El agua contribuye a la estabilidad del funcionamiento del entorno y de los seres y organismos que en él habitan, siendo un elemento indispensable para ellos. La sociedad recurre al agua para generar y mantener el crecimiento económico y la prosperidad, a través de actividades tales como la agricultura, la pesca comercial, la producción de energía, la industria, el transporte y el turismo, entre otros (Silva, 2019).



Fig. 1. El agua en el mundo. (Comisión del Agua del Estado de México, 2019).

Otro problema importante relacionado con la posibilidad de utilizar el agua es su grado de contaminación, ya que si no tiene la calidad adecuada puede agravar el problema de

la escasez. Las aguas de los cuerpos superficiales y subterráneos se contaminan por las descargas sin tratamiento previo, de aguas municipales e industriales, así como por los arrastres que provienen de las zonas que practican actividades agrícolas y pecuarias (SEMARNAT 2015).

La calidad natural del agua subterránea es producto de la interacción del agua de infiltración y los materiales geológicos con los que entra en contacto. Determinados factores naturales o antropogénicos pueden provocar alteraciones en su composición al introducir sustancias ajenas susceptibles de modificar su naturaleza original. Muchas veces, actividades como derrames de hidrocarburos en gasolineras, así como fugas en centrales de almacenamiento o refinerías, pueden causar gran impacto en las aguas subterráneas al ingresar directamente al acuífero, provocando una gran alteración a su estado natural debido a que su complejidad afecta directamente su degradación y por lo general los hace muy persistentes en el medio ambiente (Mackey & Cherry, 1989; Ahmed y Fakhruddin, 2018).

## **1.1 Antecedentes**

### **1.1.1 Estudios previos generales**

Los agentes contaminantes del recursos hídrico tanto superficial como subterráneo tiene su origen principal en las actividades antropogénicas y la vulnerabilidad del suelo para pequeñas y grandes áreas urbanas; no obstante, las zonas rurales no escapan de la actividad humana contaminante, pues las aguas servidas contienen excretas humanas y animales, residuos químicos e industriales de empresas privadas o estatales, contaminantes de minería o de la explotación del petróleo y residuos químicos de campos agrícolas que usan antibióticos, insecticidas y fertilizantes. Dentro de las sustancias químicas que más riesgo pueden causar a la salud de la población están los metales pesados, los contaminantes emergentes, las sustancias radiactivas, los insecticidas, los fertilizantes, los derivados del petróleo, los residuos tóxicos industriales, los jabones, las drogas lícitas e ilícitas, entre otras (Gómez-Duarte, 2018).

La contaminación de suelos y sistemas hídricos por hidrocarburos derivados del petróleo es un serio problema global. Los hidrocarburos derivados del petróleo se clasifican como

contaminantes emergentes. Cuando son liberados al ambiente, su comportamiento y dirección cambian dependiendo sus concentraciones y propiedades (Figura 2). Los hidrocarburos con alto peso molecular (DNAPL) son tóxicos y rara vez se movilizan en superficies de pluma de contaminación cuando se comparan con los de bajo peso molecular (LNAPL). Los compuestos más densos son capaces de perdurar por mucho tiempo en el área afecta, su movilidad es muy lenta y se adhieren al sustrato que esté presente. Los compuestos más ligeros, a diferencia de los pesados, tienen una movilidad más rápida por su baja densidad, son arrastrados por las corrientes de flujo de las aguas subterráneas hasta su desembocadura (Logeshwaran et al., 2018).

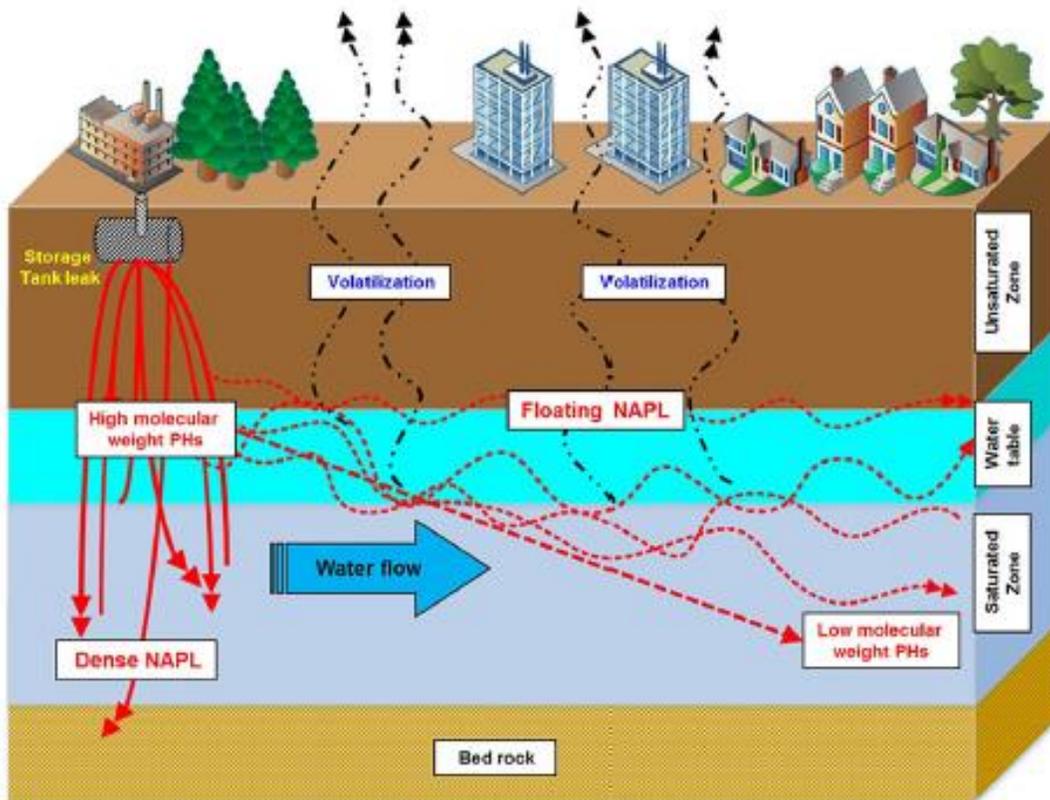


Fig. 2. Movilidad del hidrocarburo en el agua subterránea (Logeshwaran et al., 2018).

Existen grandes variedades de compuestos derivados de los hidrocarburos, su composición varía una de otra, pero si en algo se caracterizan es por ser sustancias muy agresivas, tanto para el medio ambiente como para la salud de todos los seres vivos. Los hidrocarburos son sustancias que pueden perdurar por muchos años en el medio ambiente y es muy difícil su degradación o eliminación. Al ocurrir este tipo de problemas,

se han optado medidas para la interpretación e investigación de este agente contaminante, para ello se han realizado estudios para la evaluación de hidrocarburos presentes en aire, agua y suelo (Palazzi et al., 2018; Zhang et al., 2019).

En el 2019, Zhang et al., al tener distribuciones insuficientes en el agua potable en China y perfiles de composición en el agua potable aún no claros, desarrollaron una investigación en la que analizaron los 16 hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) prioritarios en el agua potable de diferentes ciudades del centro de China. En la escala nacional, la concentración de la suma de los 16 HAP ( $\Sigma 16$  HAP) prioritarios designados por la Agencia de Protección Ambiental (USEPA) estaban en un rango de 3.89 – 231.39 (media 56.25)  $\text{ngL}^{-1}$ . Con la disminución de  $\Sigma 16$  HAP, la concentración de HAP de 3 anillos disminuyó, mientras que su proporción aumentó, lo que indica que los HAP de 3 anillos pueden ser más difíciles de eliminar que otros HAP en agua potable.

Más tarde, en el 2020, Sandoval Herazo & Lizardi Jiménez, realizaron un estudio sobre la presencia de hidrocarburos presentes en cenotes del estado de Quintana Roo, una región turística importante en el Caribe. Se encontró fenantreno, naftaleno y benceno entre los hidrocarburos contaminantes más comunes presentes en los cenotes ubicados en Cancún y Playa del Carmen, dos polos turísticos bien desarrollados originados por las actividades petroleras del Golfo de México. Otras regiones de Quintana Roo, con desarrollo de turismo intermedio (Puerto Morelos, Tulum, Cozumel y Bacalar) mostraron la presencia de hidrocarburos también. La concentración de hidrocarburos también está relacionada con la temporada turística, los cenotes durante temporada “alta” mostraron mayor concentración y diversidad de hidrocarburos que en temporada “baja”.

De la Fuente Solís (2021), realizó un estudio en Cadereyta Jiménez, Nuevo León, en el cual investigó la presencia de compuestos orgánicos volátiles (COV) BTEX en agua superficial y subterránea en una zona alejada a la Refinería “Héctor R. Lara Sosa”, sus resultados demostraron altas concentraciones de benceno y tolueno, los cuales oscilaron entre 0.06 a 77.654 ppm principalmente en las muestras de agua superficial, sobrepasando de manera excesiva los límites máximos permisibles de normativas tanto nacionales como internacionales.

### 1.1.2 Pasivos ambientales

Como se ha demostrado, en México y en todo el mundo existen extensas áreas contaminadas por hidrocarburos, esto debido al mal manejo de los diferentes procesos petroleros que conlleva la producción de combustibles fósiles. Los sitios contaminados son alterados en sus características físicoquímicas y biológicas, con lo que afectan el ámbito social y ambiental. A estos eventos se les conoce como pasivos ambientales, los cuales se consideran sitios contaminados, que no ha sido remediados, en el que pueden, además, encontrarse depósitos o apilamientos de residuos sólidos, de manejo especial o peligrosos, los cuales deben de ser manejados conforme a la legislación vigente (SEMARNAT, 2005).

Tal es el caso de la ex-Refinería "18 de marzo" de Petróleos Mexicanos (PEMEX), en la Ciudad de México, la cual durante 58 años desarrolló actividades de refinación, almacenamiento y distribución de hidrocarburos que produjeron derrames que impactaron el suelo y el agua, dando como resultado la aparición de un pasivo ambiental al cierre de esas instalaciones. Considerando lo anterior, se realizó una investigación en la cual se propuso la determinación de un perfil de masas en suelo de benceno y de hidrocarburos de fracción ligera (HFL), antes y después de un proceso de remediación por profundidades. Las cargas de masa calculadas antes de la remediación para benceno fueron de 10 139 kg y de 437 090 kg para HFL; después de la remediación fueron de 1 092 kg de benceno y de 34 992 kg de HFL, de un total de 642 muestras de 122 perfiles en un volumen de suelo de 680 356 m<sup>3</sup>. La masa de benceno y de HFL después de la remediación se considera aceptable, ya que las concentraciones de las muestras no rebasan los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 (García Villanueva & Fernández-Villagómez, 2014).

En el pasivo ambiental de Puebla se realizó una investigación cualitativa con un diseño transversal con nueve informantes, dos comisarios ejidales y siete ejidatarios; todos ellos con suelos afectados por derrames provenientes de los gasoductos que atraviesan la localidad. Se definieron categorías apriorísticas y emergentes. Los entrevistados mencionaron que se ha incrementado la frecuencia de derrames debido al robo de combustible, ocasionando daños humanos, al patrimonio y ecológicos (Cavazos-Arroyo,

Pérez-Armendáriz, & Mauricio-Gutiérrez, 2014). Los daños que los derrames han ocasionado pueden clasificarse básicamente en tres: humanos, al patrimonio, y ecológicos. Dentro de los daños humanos han involucrado principalmente intoxicaciones y una muerte en el 2012. También, cada vez que existe un derrame de hidrocarburos se provoca la afectación al suelo y al agua superficial y subterránea (Cavazos-Arroyo et al., 2014).

### **1.1.3 Contaminación por compuestos orgánicos volátiles (COV): benceno, tolueno, etilbenceno, m/p – xileno y/o – xileno (BTEX).**

Los BTEX son un grupo de compuestos orgánicos volátiles pertenecientes a la familia de los hidrocarburos aromáticos, que se caracterizan por encontrarse en forma de vapor a temperatura ambiente y por ser insolubles en agua, pero muy solubles en otras sustancias. Este alto poder disolvente hace que dichos compuestos, sobre todo tolueno y xileno, sean muy apreciados por la industria. (ATSDR, 2017).

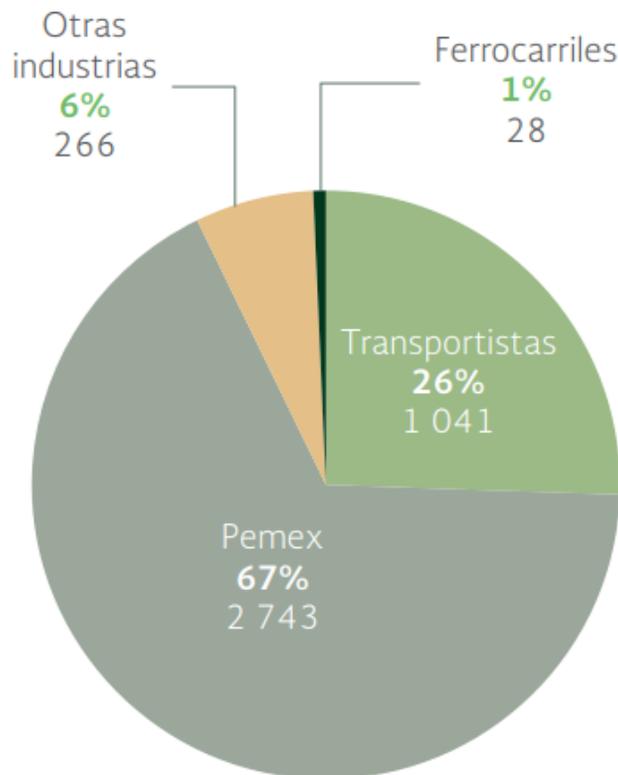
Los BTEX pueden proceder de fuentes naturales (incendios forestales o emisiones volcánicas) o artificiales, siendo estas últimas las más importantes. El hecho de que se encuentren de manera natural en el petróleo y en sus derivados hace que la mayoría de los procesos de combustión de hidrocarburos (tanto ligados a la industria como al tráfico rodado) sean importantes fuentes de emisión de estos compuestos. A estas fuentes hay que añadir los procesos industriales que los emplean como intermediarios para la fabricación de otros productos. Así como, el humo del tabaco como otras de las principales fuentes emisoras de estos COV (Hinwodd et al., 2016).

La industria petroquímica en México se ha desarrollado aceleradamente, generando diversos satisfactores económicos. Sin embargo, su expansión y desarrollo también ha dado origen a graves problemas ambientales, derivados de emergencias ambientales, con graves repercusiones a la salud de la población y al equilibrio ecológico de los ecosistemas (PROFEPA, 2016). Entre las causas que han generado este deterioro ambiental por la contaminación de cuerpos de agua y suelos a lo largo de todo el país, se encuentran las siguientes: manejo inadecuado y abandono de materiales y residuos peligrosos; mantenimiento inadecuado o falta de éste en instalaciones petroleras; explosiones en instalaciones de alto riesgo; fugas en líneas de conducción; derrames de

hidrocarburos, pruebas de hermeticidad en tanques de estaciones de servicio, entre otros (CENAPRED, 2017).

Entre 2008 y 2015 se identificaron 4 078 sitios contaminados por emergencias ambientales, de este total, Pemex tuvo responsabilidad en 2 743 sitios (67.3 %), los transportistas fueron los responsables en 1 041 sitios (25.5 %), otras industrias provocaron emergencias en 266 sitios (6.5 %) y los ferrocarriles generaron 28 (0.7 % del total) (PROFEPA 2016; Figura 3).

Los contaminantes que estuvieron involucrados en el mayor número de emergencias ambientales en el periodo 2008 – 2015 fueron los hidrocarburos, con 1 175 emergencias (29.8 % del total), la gasolina, con 1 057 (26.8%), el diésel con 554 (14.1 %), el petróleo crudo con 461 emergencias (11.7 %), el gas L. P. con 375 emergencias (9.5 %); el gas natural 162 (4.1 %) y el combustóleo en 159 casos (4 %). Los dos primeros contaminantes estuvieron involucrados en el 56.6 % de las contingencias ambientales registradas en ese período (PROFEPA 2016; Figura 4).



**Fig. 3.** Sitios contaminados por emergencias ambientales según responsables involucrados, 2008 – 2015 (PROFEPA 2016).

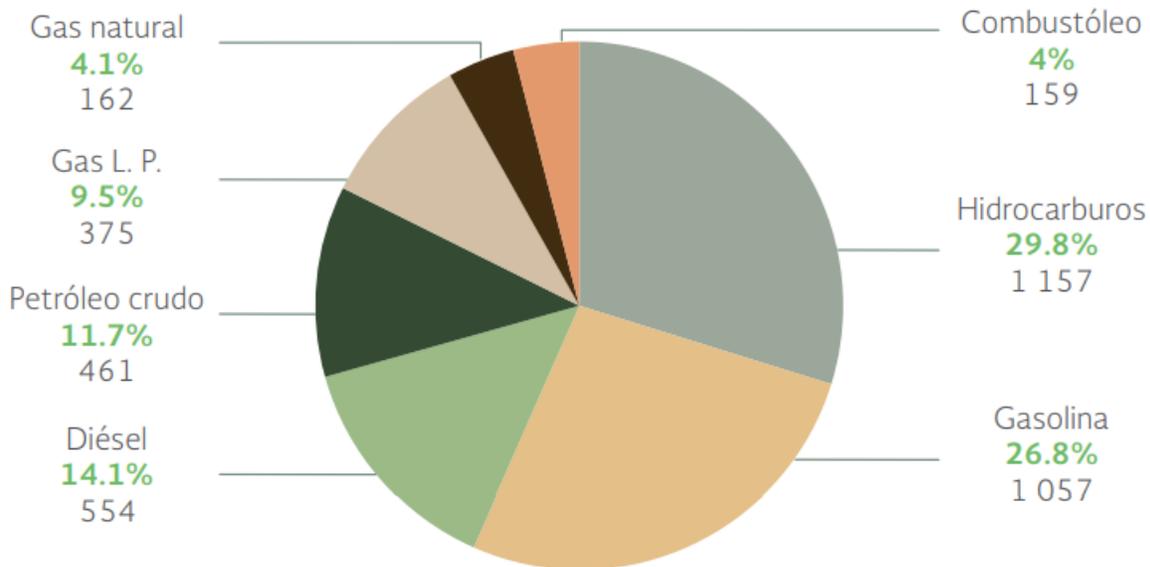


Fig. 4. Contaminantes involucrados en emergencias ambientales, 2008 – 2015 (PROFEPA 2016).

#### 1.1.4 Antecedentes en la zona de estudio

En la región de Linares, N.L. México existen diversas zonas que facilitan la probable infiltración de contaminantes hacia el agua subterránea. En dirección SW-NE fluye el río Pabillo, el cual presenta una directa conexión hidráulica con el agua subterránea. Sobre su cauce se descargan aguas residuales de origen doméstico e industrial.

En el 2003, se realizó un estudio sobre el agua subterránea de la ciudad industrial de Linares, Nuevo León, esto debido al derrame ocurrido en la estación de servicio #4003 Linares, PEMEX en el año de 1994, infiltrándose más de 40,000 litros de gasolinas y diésel durante las pruebas de hermeticidad de los tanques de almacenamiento. Se hizo una caracterización fisicoquímica – bacteriológica de las aguas subterráneas y superficiales, realizando análisis de metales pesados e hidrocarburos totales de petróleo (HTP). Los análisis de metales pesados se efectuaron en un solo pozo, resultando los valores de arsénico, bario, cromo, mercurio, plomo, y selenio por arriba de los límites máximos permisibles según normas oficiales mexicanas para agua potable, mientras que cadmio, níquel y plata se localizan por debajo de la norma. Los análisis para HTP se realizaron en todos los aprovechamientos hidráulicos, teniendo como resultados valores muy por arriba de los límites máximos permisibles (PAICYT 2003).

Posteriormente, en el año 2006, en la ciudad industrial de Linares, Nuevo León, México se realizó una investigación geológica – ambiental, la cual consistió en determinar los agentes contaminantes que se encontraban presentes en el agua subterránea de la ciudad industrial de Linares, N.L. En dicha investigación, se tomó como área de estudio una mayor periferia, la cual abarcó la estación de servicio #4003 (lugar donde ocurrió el derrame en el año de 1994) y la central de rebombeo #5, ambas de PEMEX. Se realizó medición y toma de muestras de agua subterránea de los diferentes aprovechamientos hidráulicos dentro de la zona de estudio, tanto aguas arriba como aguas abajo. Con las muestra tomadas en campo se realizaron diferentes análisis, como lo fue el análisis de espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS), los resultados indicaron grandes concentraciones de metales pesados como: sodio, litio, potasio, titanio, vanadio, cromo, bromo, rubidio, entre otros, dichos elementos fueron comparados con base a los límites máximos permisibles para metales pesados en agua potable establecidos por la EPA/USA (mg/L), la Comunidad Europea (EC) y la NOM-127-SSA1-1994, cabe mencionar que los resultados de metales pesados se encontraron sobrepasando los límites máximos permisibles. Por último, se determinaron los hidrocarburos totales de petróleo presentes en el agua subterránea por medio del analizador portátil de hidrocarburos (PHA) Petrosense, el cual consiste en un instrumento basado en una microcomputadora portátil de lectura *in-situ* directa. El resultado de cada medición se obtuvo como ppm de p-xileno, que mediante factores de conversión ya determinados por la PHA Petrosense se pudieron realizar las equivalencias de los valores para obtener los HTP de cada punto muestreado. Los valores obtenidos de HTP fueron desde 19.89 hasta 78 240.6 ppm, los cuales comparados con diferentes normativas tanto nacionales como internacionales se encontraron sobrepasando por mucho el LMP para HTP en aguas naturales (PAICYT 2006).

### **1.1.5 Justificación**

La población en el Municipio de Linares, N.L. se ha ido incrementando considerablemente en los últimos años. El constante crecimiento de su población, así, como el desarrollo de las actividades industriales, agrícolas y los diferentes usos de suelos, demandan una mayor cantidad de agua con una calidad adecuada para

satisfacer sus necesidades, ejerciendo presión sobre los acuíferos del área. Parte del agua que se consume es extraída del subsuelo. Existen numerosos aprovechamientos hidráulicos (pozos y norias) que son utilizados para satisfacer las demandas municipales (consumo humano, domestico, comercial, residencial y de servicios), agrícolas, ganaderas e industriales de la región.

Existen indicios de sobreexplotación y contaminación del agua subterránea (De León-Gómez y Medina-Barrera, 2000). Esta tendencia de asociar los niveles de contaminación con el crecimiento de poblaciones es característica del desarrollo regional en varias partes del mundo.

Cabe mencionar que la ciudad industrial de Linares, N.L. ha presenciado diversos impactos ambientales, uno de ellos fue el gran derrame de 1994, en el cual se infiltraron más de 40,000 litros de gasolinas y diésel hacia el acuífero de grietas ubicado en el fraccionamiento Arboledas del Valle y el ejido Camacho, generando la cancelación de una serie de pozos y norias con usos de suministro para agua potable. Otro evento importante fue los derrames ocurridos por fugas en las tuberías dentro de la estación de rebombeo #5 de PEMEX, provocando gran infiltración al subsuelo, impactando las aguas subterráneas. Medidas de remediación se realizaron por parte de la Subsecretaría de Ecología del Estado de Nuevo León, a través de un programa de bombeo intenso mediante la construcción de pozos de extracción y monitoreo, sin embargo, se sospecha la persistencia del problema, es por ello por lo que se pretende llevar a cabo esta investigación para poder determinar el impacto ambiental que están teniendo la planta de rebombeo #5 y la estación de servicio #4003 de PEMEX en las aguas subterráneas de la ciudad industrial de Linares, Nuevo León, México.

## **1.2 Hipótesis**

La planta de rebombeo #5 y la estación de servicio #4003 de PEMEX, ubicadas en la ciudad industrial de Linares, Nuevo León, México serán las principales fuentes aportadoras de compuestos derivados del petróleo al acuífero presente en la zona de estudio, generando gran impacto ambiental al infiltrarse al agua subterránea que abastece a la población de la ciudad industrial de Linares.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Identificar las principales fuentes aportadoras de agentes contaminantes derivados del petróleo, evaluar la presencia y caracterizar dichos compuestos para determinar el impacto ambiental provocado al acuífero presente en la zona de estudio.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Delimitar el área de estudio en la ciudad industrial de Linares, Nuevo León, México.
2. Cartografiar el área de estudio para su identificación geológica – estructural para la caracterización de terrazas.
3. Documentar el área de estudio para ubicación de aprovechamientos hidráulicos (pozos, arroyos, afluentes, etc.) para su muestreo.
4. Generar la base de datos espacial con la ubicación y características de los puntos a muestrear.
5. Realizar medición de niveles estáticos a los aprovechamientos hidráulicos documentados.
6. Elaborar la serie de cartas piezométricas de la zona de estudio para determinar las direcciones de flujo del agua subterránea.
7. Realizar muestreo de agua subterránea de los puntos accesibles marcados para su muestreo.
8. Realizar análisis de laboratorio a las muestras de agua subterránea tomadas en campo.
  - a) Determinación de parámetros fisicoquímicos.
  - b) Determinación de iones mayoritarios.
  - c) Determinación de compuestos derivados de hidrocarburos (BTEX).
9. Identificación de las familias de aguas presentes en la zona de estudio.
10. Evaluar la presencia de contaminantes de acuerdo con diferentes NORMATIVAS.

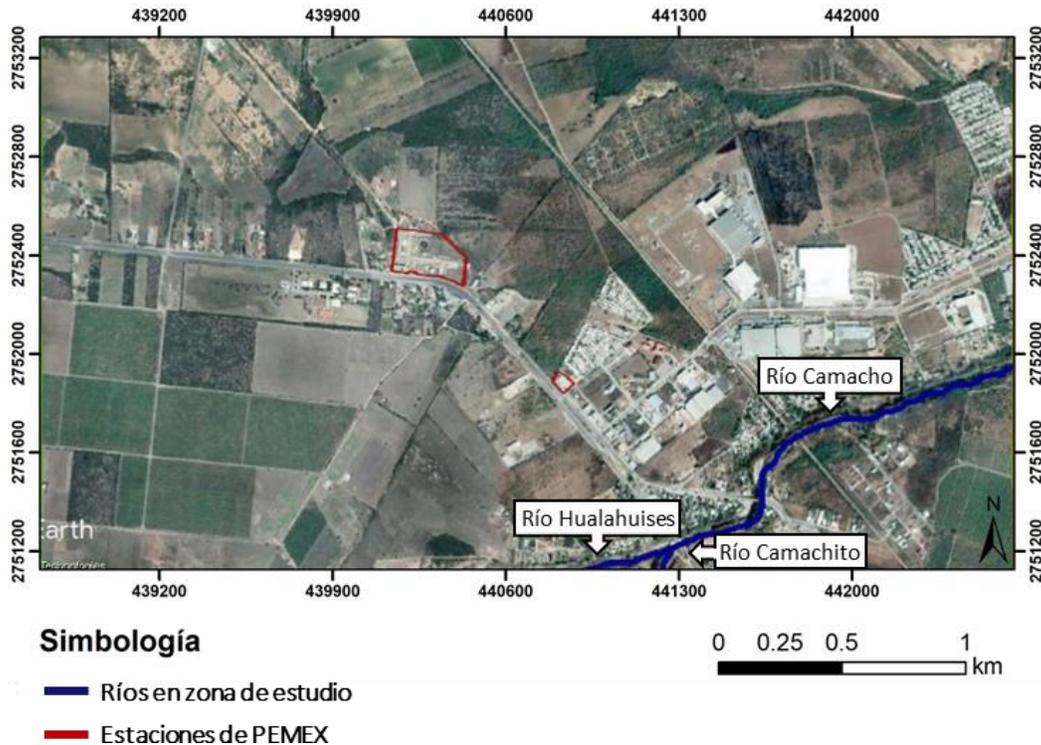
# CAPÍTULO 2: **GENERALIDADES**

## Capítulo 2: GENERALIDADES

### 2.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra al Noroeste de la Ciudad de Linares, Nuevo León, México; comprendida en un área de 8.5 km<sup>2</sup> (Figura 5), se encuentra en la región hidrológica de San Fernando-Soto La Marina (RH – 25), cuenca Río San Fernando, específicamente en la subcuenca del Río Limón (PAICYT 2003). El área de estudio está delimitada por las coordenadas UTM 438717E; 2753292N y 442655E; 2751117N.

Los ríos de mayor importancia en la región son: el Hualahuises, Camachito, ambos tributarios del río Camacho y este tributario de río Pablillo, colector de la presa Cerro Prieto, la cual abastece de agua potable a la ciudad de Monterrey y su Área Metropolitana.



**Fig. 5.** Localización del área de estudio. (Elaboración propia, con imagen de Google Earth, 2021).

### 2.2 Fisiografía

La zona de estudio se localiza al pie de la Sierra Madre Oriental (SMO), dentro de la Planicie Costera del Golfo (PCG). Esta ubicación la convierte en una zona transicional

entre estas dos provincias fisiográficas, ya que está formada por un amplio valle cubierto por material aluvial, en el que se localizan algunos lomeríos de poca elevación. Dichos lomeríos están constituidos por rocas lutíticas de la Formación Méndez las cuales están altamente fracturadas. El intenso fracturamiento es producto de los esfuerzos compresivos que actuaron en la deformación sobre la SMO durante la Orogenia Laramide. La cercanía del área de estudio respecto al pie de la SMO permite suponer que los pequeños plegamientos que aquí se localizan, así, como su intenso fracturamiento son producto de dichos eventos compresivos. Sobre los valles se depositan sedimentos de origen aluvial en diferentes terrazas o niveles de edad Cuaternaria, producto del intemperismo, erosión, transporte y sedimentación de rocas consolidadas (Padilla y Sánchez, 1978; 1985).

### **2.3 Suelos**

La cubierta superficial más reciente en el área es compuesta por suelos provenientes del material aluvial, predominando en la zona del valle los vertisoles que tienen textura arcillosa. Los suelos localizados en las laderas y sobre los lomeríos tienen una textura limo-arenosa, clasificados como rendzinas con un cementante calcáreo (INEGI, 2009).

### **2.4 Clima y vegetación**

La zona de estudio se encuentra aproximadamente a 356 m s.n.m. en una región con clima semiárido subtropical, con altas temperaturas y lluvias al principio y final del verano, precipitación escasa el resto del año y severas heladas en algunos inviernos. La temperatura media anual es de 22.3 °C, mientras que la precipitación anual promedio es de 805 mm. En promedio existen 84 lluvias al año, de las cuales el 60 % poseen menos de 5 mm y solo el 10 % son capaces de producir escorrentías superficiales, con intensidades superiores a 20 mmhr<sup>1</sup> (Návar y Synnott 2000). La dirección del viento predominante es SE durante los meses de febrero a noviembre, mientras que en los meses de enero y diciembre del mismo año la dirección es hacia el N. El tipo de vegetación predominante son los matorrales altos espinosos y subinermes, caracterizados por arbustos altos y árboles bajos, característicos de climas subtropicales o semi-áridos del Noreste de México (González-Elizondo, 1996). Se caracteriza por la

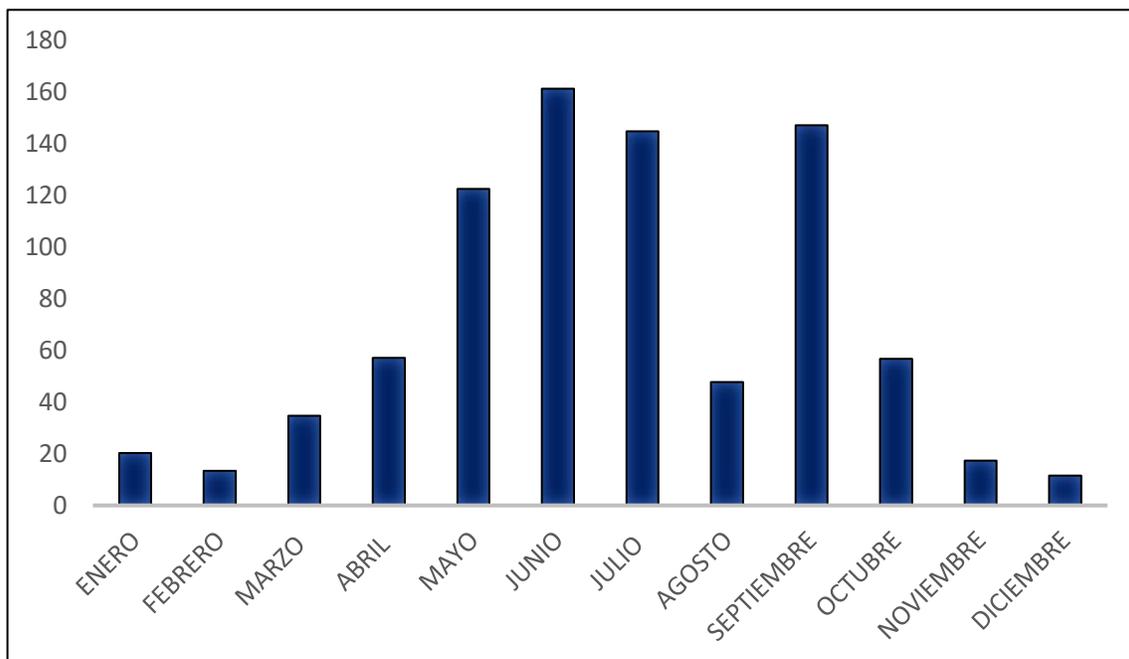
presencia de arbustos medianos de 1 a 2 m de altura, compuestos predominantemente por especies inermes y caducifolias, combinadas con especies espinosas (INEGI 2009).

## 2.5 Precipitación

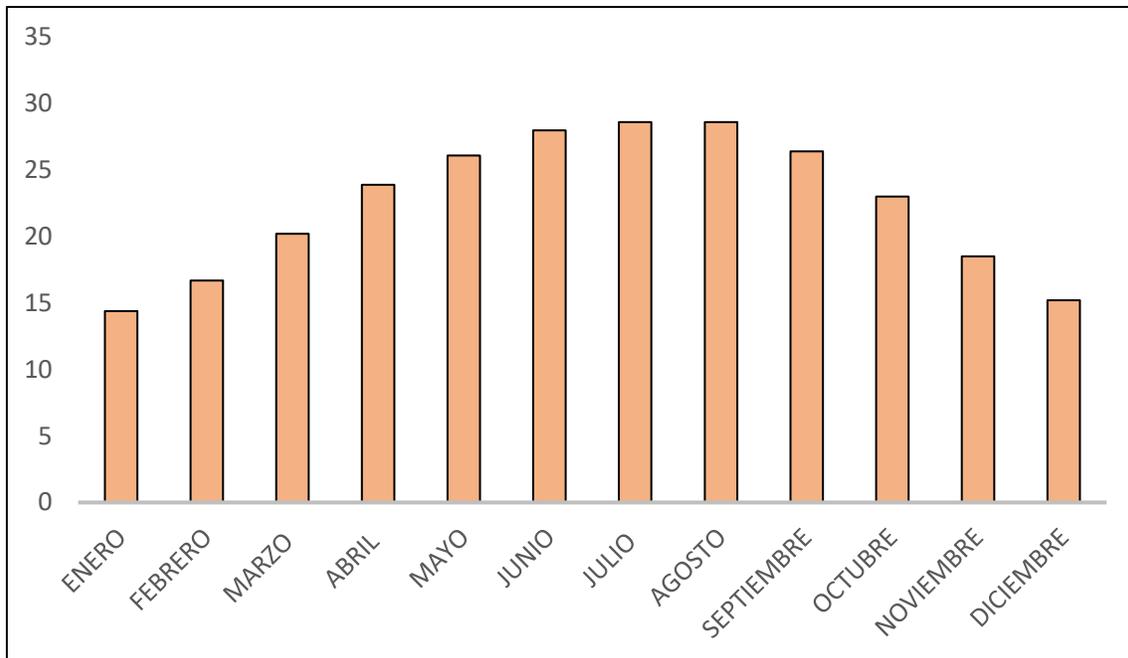
Dentro del área de estudio se encuentra operando la estación meteorológica “Camacho” (19035), la cual muestra el Promedio Diario de Precipitación del año 1924 – 2021 (Figura 6), siendo los meses de mayo, junio, julio y septiembre los que presentan una mayor precipitación con 122 (mm), 161 (mm), 145 (mm) y 147 (mm), respectivamente (INEGI 2001 – CONAGUA 2021).

## 2.6 Temperatura

Con base a la misma estación de monitoreo que se encuentra dentro del área de estudio, se realizó un análisis estadístico con los datos obtenidos por CONAGUA para representar el promedio anual del valor de temperatura mensual que va desde el año 1924 – 2021 (Figura 7). Siendo los meses de junio, julio y agosto los que presentan las temperaturas más altas registradas a través de los años (INEGI 2001, – CONAGUA 2021).



**Fig. 6.** Estación Climatológica: Camacho (19035), Linares, Nuevo León, México. Promedio de precipitación mensual, período 1924 – 2021 (CONAGUA, 2021).



**Fig. 7.** Estación Climatológica: Camacho (19035), Linares, Nuevo León, México. Promedio de temperatura mensual, período 1924 – 2021 (CONAGUA, 2021).

## 2.7 Hidrología

La zona de Linares queda comprendida en la porción N de la Subcuenca del río Limón (río Pablillo), localizada a su vez dentro de la Cuenca del río San Fernando, en la Región Hidrológica San Fernando - Soto La Marina, abarcando una superficie de 1 708 km<sup>2</sup> (INEGI, 2009). El drenaje es de tipo dendrítico e intermitente, conformado por el río Pablillo el cual nace al SW del área, en la Sierra Madre Oriental. Su cauce atraviesa transversalmente de SW a NE el área hasta desembocar en la presa Cerro Prieto, siendo su colector principal; aporta un promedio anual de 138 millones de m<sup>3</sup> (De León-Gómez, 1993). Existen además pequeños tributarios que se desprenden de las elevaciones al S y SW del área.

## 2.8 Hidrogeología

El área de estudio se localiza en una zona de valle considerada como zona de descarga, donde las principales fuentes de aportación hacia el acuífero están constituidas por el flujo subterráneo y el flujo superficial formado por el cauce del río Camacho que provienen de la zona de recarga en la SMO, el cual, es tributario al río Pablillo. Además, existen escurrimientos secundarios, precipitaciones periódicas ocurridas durante el año,

así como el uso del suelo, que contribuyen también a su recarga. La dirección de flujo de las corrientes superficiales es dominada por la topografía del terreno, cuya dirección general es de SW a NE y la orientación del flujo del agua subterránea es definida por el gradiente hidráulico en la misma dirección (Lizárraga, 2003).

Existen dos unidades hidroestratigráficas, un acuífero de fracturas (grietas) constituido por las lutitas de la Formación Méndez y calizas-lutitas-margas de la Formación San Felipe en la base; el otro acuífero es somero y de poros constituido por los materiales aluviales, paquetes de gravas y arenas pertenecientes a las terrazas del río Camacho y conglomerados pertenecientes al Terciario y Cuaternario transportados desde la SMO a la Planicie Costera del Golfo de México. Su potencial hidrogeológico es medio-alto ya que presentan espesores mayores a los 10 m, así como su distribución superficial (Lizárraga, 2003 – PAICYT 2003).

## **2.9 Geología**

### **2.9.1 Geología regional**

La Sierra Madre Oriental es una provincia fisiográfica que representa a la cadena de montañas más elevada en el norte y oriente de México; su longitud alcanza más de 1 000 kilómetros, presenta entre 80 y 200 km de amplitud y un promedio de altura de 2 200 m s.n.m. Este relieve montañoso separa una amplia meseta elevada, al oeste, de la Planicie Costera del Golfo de México, al este. Geográficamente, en México se extiende desde Parral, Chihuahua, hasta Zongolica, Veracruz. En sus extremos NO y SE, la SMO está cubierta por derrames volcánicos y rocas piroclásticas del Cenozoico de la Sierra Madre Occidental y del Cinturón Volcánico Transmexicano (Eguiluz et al., 2000), respectivamente, y continúa más al NO y SE con rasgos enmascarados hacia Chihuahua-USA (King, 1939) y en la Cuenca de Veracruz (Rodríguez et al., 1997, y Viniegra, 1966).

Estructuralmente, Campa y Coney (1983) denominaron a la SMO como el cinturón de pliegues y cabalgaduras mexicano, esto porque su estructura tectónica se compone esencialmente de pliegues y fallas inversas. Forma parte de la Cordillera de Norteamérica, la cual se extiende desde Alaska, pasa por la parte occidental de Canadá

y Estados Unidos e incluye a casi todo México. La Cordillera de Norteamérica es un relieve montañoso desarrollado por al menos cinco orogenias: Antler, Sonoma, Nevadiana, Sevier y Laramide. Las cuales ocurrieron en los últimos 350 millones de años, producto de la interacción de las placas oceánicas Kula y Farallón bajo la placa de Norteamérica (Dickinson, 2004); las orogenias Sevier (130 – 50 Ma) y Laramide (80 – 40 Ma) son las responsables de los pliegues y cabalgaduras más jóvenes de la Cordillera en Canadá, Estados Unidos y México.

La SMO está compuesta principalmente de rocas sedimentarias marinas evaporíticas, clásticas y calcáreas de edad Jurásico Medio al Paleógeno (Goldhammer et al., 1991; Goldhammer, 1999; Michalzik, 1988).

La secuencia marina cubre a rocas metamórficas del Precámbrico y Paleozoico, así como a rocas volcanoplutónicas de los arcos Permo-Triásico (Torres et al., 1999) y Nazas del Jurásico, desarrollados en el oriente y centro de México; así como a rocas clásticas de origen continental del conocido Grupo Huizachal del Triásico-Jurásico inferior en el oriente del país (Barboza Gudiño et al., 2010; Figura 8).

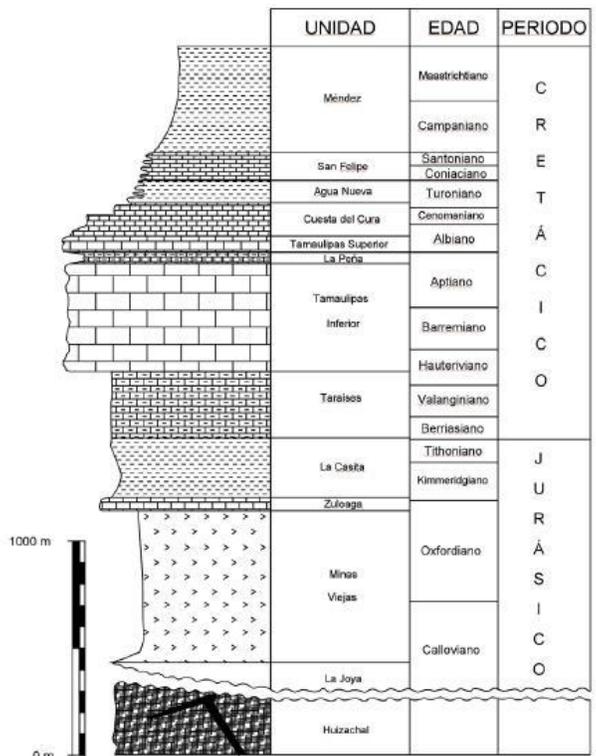


Fig. 8. Columna estratigráfica de la Sierra Madre Oriental (Michalzik, 1988).

## **2.9.2 Geología local**

El área de estudio se localiza en la Planicie Costera del Golfo Norte, perteneciente a la Sierra Madre Oriental, la cual se vio influenciada por los eventos compresivos que la deformaron. Las estructuras existentes presentan orientaciones generales al NW-SE que concuerdan con el tren estructural de la SMO. El intenso fracturamiento que predomina en las rocas es debido a dichos esfuerzos compresivos. La geología del área de estudio la conforman rocas de la Formación Méndez de edad Cretácica, conglomerados Terciarios y sedimentos aluviales del Cuaternario. Rocas consolidadas pertenecientes a la Formación Méndez son compuestas principalmente por lutitas y areniscas calcáreas de baja permeabilidad, que al estar fuertemente fracturadas generan el medio ideal para la infiltración de los escurrimientos superficiales e hidrocarburos hacia el agua subterránea, dando resultado a un acuífero de grietas con alta conductividad hidráulica. Sobre esta formación se depositan espesores de conglomerados en diferentes niveles o terrazas de edad Terciaria y Cuaternaria, producto del transporte de antiguos cauces de ríos y arroyos. Estos conglomerados se fueron depositando en forma horizontal en los valles y con ligeras inclinaciones. Los conglomerados, así como los sedimentos aluviales componen el acuífero de poros, cuyo espesor somero y sus propiedades de permeabilidad facilitan la infiltración y el transporte de contaminantes, sobre los lomeríos (PAICYT 2003).

Gran parte del área de estudio está cubierta en la superficie por depósitos aluviales compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas, producto de la erosión de rocas consolidadas durante el Cuaternario.

## **2.10 Estratigrafía**

### **2.10.1 Formación Méndez**

Se designa con este nombre a una secuencia de lutitas de colores que varían desde gris oscuro a negro, hasta margas de estratificación laminar a delgada, de color gris claro, gris oscuro y verde olivo (López-Ramos, 1980; Padilla y Sánchez, 1978; 1985; Anderson y Aguilera, 1986). Tienen una edad Campaniano – Maastrichtiano y un espesor de 1 500 m aproximadamente (De León, 1993), aunque otros autores mencionan espesores

variables (De la Garza-González, 2000). Esta unidad presenta intercalaciones con estratos de areniscas en su techo, con estratificación media a gruesa, cuyo color es gris oscuro e intemperiza a café; ambas unidades presentan indicios de bioturbación. El ambiente de depositación es de aguas marinas profundas, en una cuenca con gran subsidencia, lo cual provocó los grandes espesores que presenta esta unidad (López-Doncel, 1990).

El macizo rocoso dentro del área de estudio se compone por lutitas intercaladas con areniscas calcáreas. Su estilo de fracturamiento es muy característico, es de tipo concoidal y en algunas áreas se encuentra muy fracturada e intemperizada, mostrando desde una estructura de laminillas, que cambian de una coloración gris en la roca sana a café amarillento, hasta suelos.

### **2.10.2 Depósitos Terciarios**

Estos depósitos son compuestos por el material aluvial que fue transportado a través de antiguos cauces, como resultado del intemperismo y la erosión de las rocas que conforman la SMO. Estos conglomerados se depositaron formando planicies, que posteriormente se vieron modificadas en distintos niveles como respuesta a un levantamiento de la región por efectos tectónicos, formándose las terrazas fluviales que se localizan topográficamente en distintos niveles. En el área de estudio no es posible asociar ninguna terraza ya que el resto de las terrazas o niveles de conglomerados corresponden a depósitos más recientes (Lizárraga, 2003).

### **2.10.3 Depósitos Cuaternarios**

El material aluvial producto del intemperismo y la erosión de las rocas que conforman la SMO transportado a través de antiguos cauces, pudo ser depositado formando planicies, las que posteriormente se vieron modificadas en distintos niveles como respuesta a un levantamiento de la región por efectos tectónicos, formándose las terrazas aluviales que se localizan topográficamente en distintos niveles (Lizárraga, 2003).

Dentro del área de estudio se encuentran los depósitos de conglomerados que descansan discordantemente sobre la Formación Méndez. Se encuentran en forma horizontal sobre el lecho del río Camacho y se distribuyen hacia los lados formando

diferentes niveles o terrazas aluviales, dentro del área de estudio solamente se encuentran aflorando las terrazas 1, 2 y sedimentos aluviales (De la Garza-González, 2000).

### **2.11 Geología estructural**

La presencia de fracturas, en especial aquellas que son abiertas son parte importante en el transporte de contaminantes, ya que pueden generar plumas de contaminación complejas, espacialmente heterogéneas y de difícil comprensión. El flujo a través de las fracturas se ve controlado por su apertura y longitud, así como la conexión que existe entre estas. Además, la orientación y densidad de fracturamiento pueden influir en la distribución de contaminantes. La importancia de realizar el análisis geológico estructural en el macizo rocoso dentro del área de estudio reside en que, entre las principales fuentes de contaminación identificadas en el área, se encuentran la planta de rebombeo #5 y la estación de servicio #4003 de PEMEX. Dichas fuentes de contaminación se ubican directamente sobre el macizo rocoso, de ahí el interés en analizar si existe conexión hidráulica entre las condiciones estructurales del área con la infiltración, así como la dirección y el transporte de derivados del petróleo hacia el agua subterránea (Lizárraga 2003).

La estructura tectónica del área de estudio la compone el anticlinal principal de Camacho, con ejes de anticlinales y sinclinales en dirección NW-SE cortados por los sistemas de fracturamiento “ac” y de menor magnitud “bc” (PAICYT 2003).

# CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO

## Capítulo 3: MARCO TEÓRICO

### 3.1 Geología

La palabra geología deriva del griego "geo" que significa tierra, y "logos" tratado o conocimiento, por lo tanto, se define como la ciencia de la tierra y tiene por objeto entender la evolución del planeta y sus habitantes, desde los tiempos más antiguos hasta la actualidad mediante el análisis de las rocas. Es considerada como una ciencia histórica ya que parte de la premisa de que el relieve actual de la Tierra es el resultado de una larga y variada evolución, por ello analiza este desarrollo espacial y temporal para señalar los factores y fuerzas que actuaron en el proceso y que le han dado la forma que actualmente conocemos, tanto en el exterior como en el interior de nuestro planeta. Las rocas de la corteza terrestre, los restos petrificados y los rastros de los organismos (fósiles), son elementos que se han utilizado para hacer la historia biológica ya que representan documentos y testimonios que permiten a los geólogos, deducir las condiciones y los acontecimientos de los siglos pasados (Servicio Geológico Mexicano, 2016).

La geología se apoya en los principios de la física que tratan sobre las leyes de la energía y de la estructura atómica; en los principios de la química que se refieren a la composición y a las interacciones de los materiales; algunos otros de la biología y la astronomía, dando origen a otras ciencias como la geofísica, la geoquímica, la paleontología, la geobotánica y la zoogeología (Servicio Geológico Mexicano, 2016).

El estudio de la geología se divide generalmente en dos partes:

- 1) Geología externa: se ocupa del estudio de los materiales que forman la corteza terrestre y los procesos de la capa atmosférica y de la biosfera que influyen sobre ella.
- 2) Geología interna: estudia los procesos que se desarrollan bajo la corteza terrestre y las causas que los producen.

Según Tarbuck (2005) la geología externa se divide a su vez en:

- 1) Geología física: estudia la constitución y propiedades de los materiales que componen la Tierra, su distribución a través del globo, los procesos que la formaron y alteraron, la

manera en que han sido transportados y distorsionados, la naturaleza y evolución del paisaje.

2) Geología histórica: estudia la evolución de la vida sobre la Tierra, desde las formas más elementales que existieron hace dos mil millones de años, hasta la flora y la fauna actual incluyendo al ser humano. También estudia los cambios del planeta a través de millones de años, el avance y retroceso de los mares, la erosión de las rocas y el depósito de los sedimentos, y la formación de cadenas montañosas.

De acuerdo con Iriondo, M (2007) de la geología se desprenden diversas ramas especializadas como son:

- Mineralogía: estudia los minerales formadores de las rocas que componen a la corteza terrestre.
- Petrología: estudia el origen, la aparición, la estructura y la historia de las rocas, las cuales se dividen en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.
- Petrografía: es la parte que describe las características de las rocas cristalinas auxiliándose con un microscopio de luz polarizada.
- Paleontología: estudia la vida prehistórica e investiga la relación entre los fósiles de los animales (paleozoología) y de las plantas (paleobotánica) con los animales y plantas existentes actualmente.
- Sedimentología: investiga los depósitos terrestres o marinos, su evolución, fauna, flora, minerales y sus texturas. Estudia los numerosos rasgos imbricados de rocas blandas y duras y sus secuencias naturales, con el objetivo de reestructurar el entorno terrestre primitivo en sus sistemas estratigráficos y tectónicos.
- Geología estructural: estudia las distintas estructuras geométricas de las rocas para su clasificación y explicar las relaciones entre ellas, su aparición y movimiento; es auxiliar del estudio de los grandes rasgos externos para la prospección de carbón y de petróleo.

### **3.1.1 Fracturas**

La fractura es una discontinuidad geológica en las rocas o suelos y es a su vez la separación en dos o más partes de un cuerpo sólido bajo la acción de un esfuerzo con una correspondiente pérdida de cohesión bajo condiciones frágiles. La generación de

una fractura ocurre cuando se libera la energía de deformación acumulada en algún suelo o roca como reacción a un cambio en las condiciones del equilibrio natural. Los procesos geológicos generan una gran variedad de tipos de fracturas, por ejemplo, fracturas relacionadas a deformación de las rocas (juntas, fallas, pliegues), fracturas relacionadas con enfriamiento de rocas ígneas, fracturas relacionadas a intrusiones salinas, fracturas relacionadas a deslizamientos, fracturas relacionadas a terremotos, fracturas relacionadas a procesos tectónicos, fracturas por subsidencia de terreno, etc. Existen también fracturas originadas por la acción de la actividad humana como pueden ser fracturas asociadas a la sobreexplotación de acuíferos en ciudades, fracturas generadas en las rocas y suelos por la construcción de obras civiles, etc. (Twiss y Moores, 1992).

Desde un punto de vista geológico las fracturas pueden clasificarse como tectónicas (relacionadas con pliegues y/o fallas), regionales, de contracción (relacionadas con diagénesis) y de superficie. Históricamente la mayor parte de la producción de hidrocarburos se ha obtenido a partir de fracturas tectónicas, seguido de regionales y las producidas por contracción (Nelson, 2001).

#### - Fracturas tectónicas.

Las fracturas tectónicas son aquellas cuyo origen puede determinarse mediante su orientación, distribución y morfología, pudiéndose atribuir a eventos tectónicos locales. Los planos de fallas, por ejemplo, son por definición planos de movimiento cortante, donde la mayoría de las fracturas desarrolladas en la vecindad de estos planos pueden ser fracturas de cizalla paralelas a estos; pueden ser conjugadas respecto al plano de falla, o también pueden ser de extensión cuyos planos pueden bisectar las dos direcciones anteriores. Las fallas se producen por el mismo campo de esfuerzos que producen las fracturas, donde el sistema es anterior al proceso de falla (movimiento) y las fracturas actúan como una zona de acondicionamiento. Hay casos en los que a gran escala el deslizamiento no ocurre, dejando sólo el sistema de fracturas precursor (Nelson, 2001).

#### - Morfología de las fracturas naturales.

La calidad de la roca fracturada como reservorio, depende de su porosidad y permeabilidad, donde la morfología de los planos de fractura controlará estos factores en yacimientos naturalmente fracturados. La morfología de las fracturas se puede observar en núcleo, afloramiento o puede ser observadas en perforaciones de pozos. Se han definido 3 tipos básicos de morfología en las fracturas naturales: fracturas abiertas, fracturas deformadas y fracturas mineralizadas (Curtín et al., 2007; Nelson, 2001).

#### - Fracturas abiertas.

Las fracturas abiertas no contienen materiales en su interior y son conductos potenciales para la transmisión de fluidos. La permeabilidad de las fracturas abiertas está en función de su apertura inicial, el esfuerzo efectivo normal al plano de fractura, la rugosidad y el área de contacto en las paredes de la fractura. Las fracturas naturales pueden subdividirse en los siguientes tipos de fracturas (Cabrejo et al., 2010):

##### 1) Fallas.

Cuando se presenta un desplazamiento medible a lo largo de un plano de fractura, esto es, si la roca a un lado de la fractura se ha desplazado con respecto a la roca del otro lado de ella, ésta se denomina falla.

##### 2) Diaclasas.

Por el contrario, si no ocurre desplazamiento o si éste es demasiado pequeño para que sea visible, se le denominará diaclasa.

#### - Fracturas mineralizadas.

Como su nombre lo indica, estas fracturas son aquellas que se han cementado con mineralizaciones secundarias por diagénesis que generalmente presentan material secundario como carbonatos, cuarzo o ambos; esta mineralización puede o no puede ser completa en el espacio fracturado. Su efecto sobre la permeabilidad depende en la integridad de llenado y la historia diagenética de la roca. Por lo general, las fracturas mineralizadas son barreras de permeabilidad, sin embargo, puede haber ciertos valores de permeabilidad medibles en el yacimiento. A menudo la mineralización es incompleta o ha sufrido algún grado de disolución, haciendo que el reservorio mantenga

permeabilidades aceptables para la producción. Este tipo de fracturas se producen con frecuencia en arenisca, lutitas y calizas (Nelson, 2001). Para fracturas mineralizadas se pueden obtener dos tipos de subdivisiones:

1) Vetas.

Las vetas son fracturas rellenas con minerales secundarios tales como cuarzo, calcita, etc.

2) Estilolitos.

Los estilolitos corresponden a superficies limitantes e irregulares, en forma de sutura, que se encajan por medio de una serie de entrantes y salientes irregulares, producidas por algún tipo de solución controlada por presión, seguida por una inmediata redeposición local, los cuales se pueden observar atravesando fósiles, en caracteres sedimentarios primarios y en cementos diagenéticos tardíos.

- Fracturas inducidas durante la perforación.

Las fracturas inducidas por la perforación proporcionan información crítica sobre el estado de esfuerzos locales y su identificación tiene directa aplicabilidad a los problemas de producción del yacimiento, migración de hidrocarburos, y la estabilidad del pozo. Los registros de imágenes eléctricas y acústicas son los medios para detectar y caracterizar fracturas inducidas en los pozos de un yacimiento. Si un pozo vertical es sometido a esfuerzos extremos por el peso de la columna del lodo de perforación, se formará una fractura hidráulica á en el azimut del esfuerzo horizontal (Nelson 2001; Quintero Legorreta O., 2002).

Muestreo de fracturas.

Para obtener un buen sistema de información es importante considerar las características que van a ser muestreadas de las fracturas, disminuyendo así los errores en el modelo y acercándose más a la realidad. El tipo de información que se requiere acerca del fracturamiento corresponde principalmente a la necesidad de conocer lo más certeramente su distribución espacial, orientación, apertura, longitud, separación, relleno mineral, textural, entre otros (Cabrejo et al., 2010).

Para obtener información confiable y representativa, es necesario apoyarse con diferentes técnicas para la obtención de la información en campo. Es esencial un correcto uso de los sistemas de posicionamiento espacial para determinar certeramente la localización de estas fracturas (Cabrejo et al., 2010)

En un muestreo del subsuelo se debe considerar que las fracturas están en posición vertical y el espaciamiento entre ellas es en general mucho mayor que el diámetro del pozo. Las características de las fracturas pueden cambiar entre capas, principalmente asociado a la diferencia de espesor, composición y procesos de deformación a los cuales fueron expuestos cada capa o estrato (Bratton T, 2006).

### **3.1.2 Discordancias estratigráficas**

Son contactos de dos estratos que no son inmediatamente sucesivos en el tiempo porque falta uno o más estratos de la serie, lo que se reconoce como una laguna estratigráfica. Las discordancias se producen generalmente porque una cuenca sedimentaria sufre una elevación que interrumpe la sedimentación, mecanismo que es seguido por un proceso erosivo que elimina algunos estratos. Si posteriormente vuelve a transformarse en una cuenca sedimentaria proseguirá el mecanismo que es seguido de la superposición de estratos (Anguita, F. 1996).

### **3.1.3 Terrazas**

Las terrazas son estructuras generalmente en forma de escalón que se encuentran sobre una corriente y su planicie de inundación, pueden ser bancos cortados en la misma roca (en ciertos casos cubiertos por sedimentos) o pueden ser escalones formados en sedimentos por la depositación y subsecuente erosión; dicho de otra forma, una llanura de inundación en un nivel por debajo del anterior (De León Gutiérrez, 1999; Martínez Quiroga, 2018).

Las terrazas fluviales generalmente se localizan a ambos lados del río y a la misma altura. Si existen varios niveles de terrazas se supone que el valle ha tenido más de un episodio de encajamiento, siendo las terrazas más antiguas las más altas topográficamente. En función de la importancia relativa de los episodios de erosión y depositación que se suceden a lo largo de la historia de un río, pueden formarse terrazas

fluviales escalonadas o terrazas encajadas. En las terrazas escalonadas los períodos de erosión que suceden a los períodos de depositación, son más importantes que éstos, de manera que el río excava todos sus aluviones y llega al sustrato rocoso dejando sólo algunos restos de sus aluviones en los bordes del valle (Tarbuck et. al., 2005).

En las terrazas encajadas los períodos de erosión no alcanzan a eliminar completamente los depósitos de aluviones anteriores, de manera que las terrazas quedan yuxtapuestas y superpuestas. De este modo, las terrazas se forman cuando una corriente llena un valle con sedimentos y labra después su cauce a un nivel inferior. Si la corriente de un río oscila de un lado a otro del valle, erosionando lateralmente, puede encontrarse con rocas resistentes que desvían la corriente y que impiden la formación de una terraza, en este caso se formara terraza sólo en un lado del valle, se forman así las terrazas disimétricas (Tarbuck et. al., 2005).

### **3.2 Hidrología**

La hidrología es la ciencia que estudia las aguas terrestres, su origen, movimiento y distribución en nuestro planeta, propiedades físicas y químicas, interacción en el medio ambiente físico y biológico e influencia en las actividades humanas, la hidrología SUPERFICIAL es la rama que se encarga de estudiar los fenómenos y procesos hidrológicos que ocurren en la superficie terrestre, en especial de los flujos terrestres (Béjar, 2004).

Los fenómenos y procesos hidrológicos parten de los análisis sobre las series de datos de la variación espacio temporal de los flujos terrestres vistos a través de algunas variables del ciclo hidrológico, como la precipitación, evaporación, escorrentía, entre otras. Generalmente, los componentes del balance hídrico que se interpolan con mayor frecuencia para el análisis de los recursos hídricos son las características de la precipitación y de la escorrentía, aunque muy a menudo también se representa la relación entre la evaporación real y potencial. Básicamente estas variables del ciclo hidrológico son monitoreadas a través de redes de medición (Gutiérrez. 2014).

### 3.2.1 Ciclo hidrológico

Es la sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la tierra a la atmósfera y volver a la tierra: evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua y reevaporación (Ciclo Hidrológico, 2011; Figura 9).

El ciclo hidrológico involucra un proceso de transporte recirculatorio e indefinido o permanente, este movimiento permanente del ciclo se debe fundamentalmente a dos causas: la primera, el sol que proporciona la energía para elevar el agua (evaporación); la segunda, la gravedad terrestre, que hace que el agua condensada descienda (precipitación y escurrimiento) y llegue a infiltrarse (Aranda, 1984).

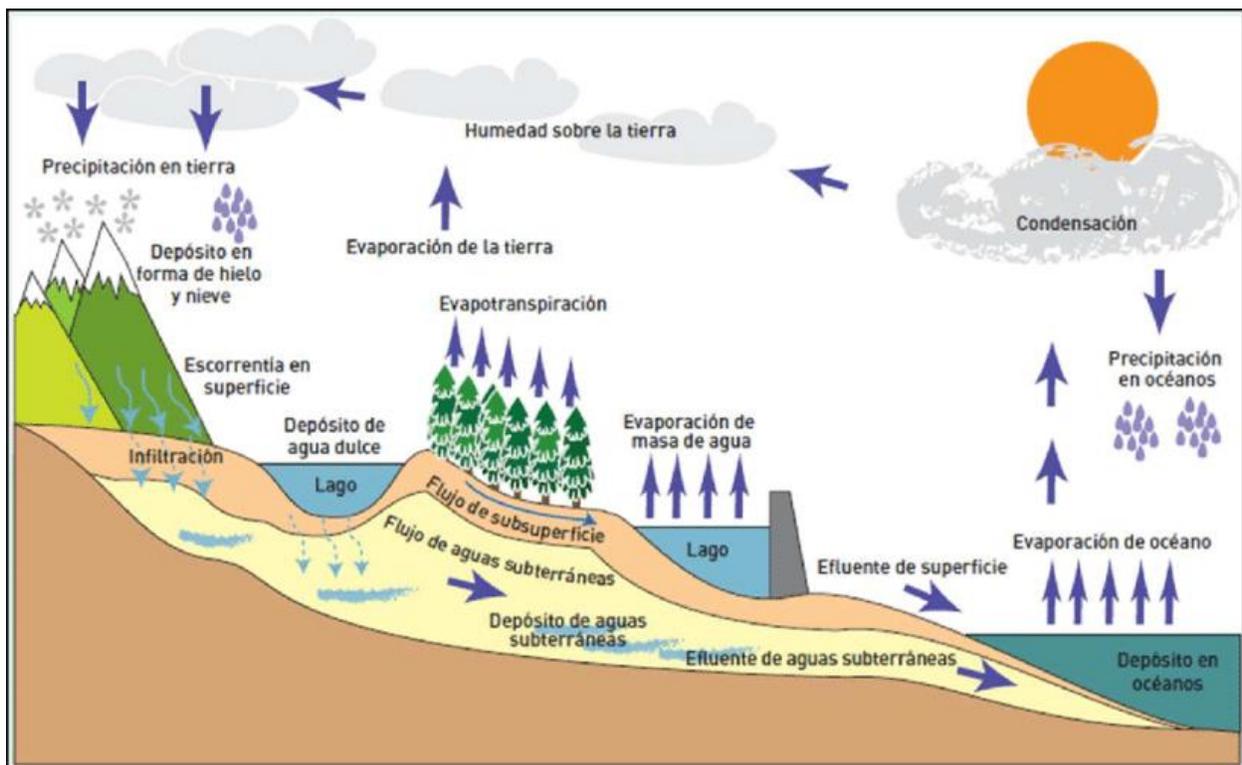


Fig. 9. Proceso del Ciclo Hidrológico (Aranda, 1984).

### 3.3 Hidrogeología

La hidrogeología es una faceta de la hidrología que trata de las aguas que están almacenadas y discurren dentro de la tierra. Durante muchos años, la hidrogeología se centró fundamentalmente, en la búsqueda y explotación de las aguas subterráneas. Sin

embargo, la creciente percepción de que la pérdida de calidad en las aguas subterráneas constituye un serio problema socioeconómico, ha permitido el desarrollo de nuevas facetas como el transporte y la transformación de los contaminantes, así como diversos métodos de caracterización, acondicionamiento, mejora y remediación de entornos afectados por la polución de las aguas (Padilla, 2012).

Por otro lado, el agua subterránea es la fuente principal de agua para el consumo humano en muchos lugares del planeta y es la base esencial para la mayor parte de los procedimientos industriales sobre los que nuestra civilización se asienta. Por ello, el agua es vulnerable frente a distintos procesos que, en conjunto, conducen a una pérdida de su calidad en sus distintas facetas de utilización. Por ello, el análisis de los factores que conducen al deterioro de la calidad de las aguas, su propagación a través del medio geológico subterráneo y los mecanismos de mejora de la misma, son aspectos clave de la hidrogeología (Padilla, 2012).

Según Custodio & Llamas (1996) la hidrogeología o hidrología subterránea es, la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, sus formas de yacimiento, difusión, movimiento, régimen y reservas, interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación.

### **3.3.1 Acuífero**

Un acuífero es toda formación geológica capaz de almacenar y transmitir el agua subterránea a través de sus poros o grietas, pudiéndose extraer en cantidades significativas mediante distintas obras de captación (Collazo-Caraballo et al, 2012). El concepto de acuífero también se refiere a rocas que almacenan y conducen cantidades de agua económicamente utilizables. Los acuíferos contienen y transmiten agua del subsuelo (Chereque, 1989; Custodio & Llamas, 1996; Werner, 1996).

### **3.3.2 Tipos de acuífero**

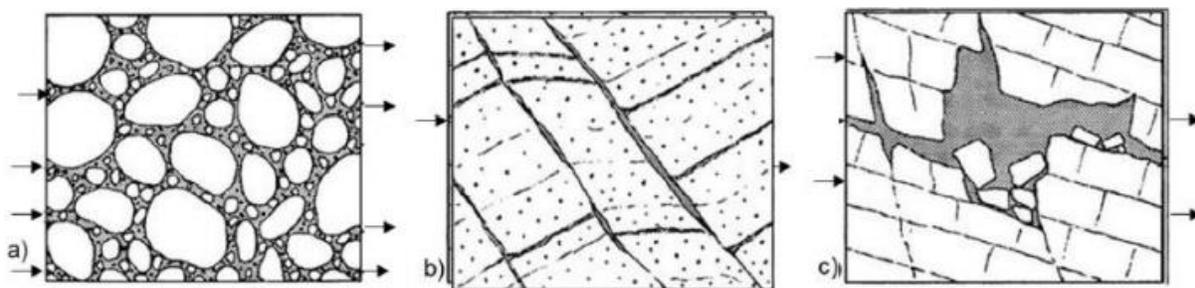
Existen diferentes clasificaciones de los acuíferos que varían de acuerdo a su composición geológica y su comportamiento hidrodinámico. Sin embargo, los más comunes son de

acuerdo a su composición geológica (litología) y su comportamiento hidrodinámico. Según Werner (1996) y Collazo-Caraballo et al., (2012), la clasificación de acuerdo a su litología, existen tres tipos principales, que van en función del tipo de sus discontinuidades geológicas (Figura 10).

- Acuíferos de poros: el agua se mueve en los poros (intersticios). Este tipo de acuíferos se trata en mayor parte de sedimentos sueltos como gravas o arenas, que varían su composición y tamaño en función de su origen geológico (fluvial, eólico, lacustre, etc.); usualmente son formaciones recientes de edad cuaternaria.

- Acuíferos de grietas: el contenido de poros generalmente es despreciable. Son rocas consolidadas como areniscas, calizas no carstificadas, basaltos, granitos u otras rocas extrusivas e intrusivas. La porosidad de estos acuíferos se debe a la presencia de zonas de alteración, fracturas de origen tectónico o de intemperismo, fallas, diaclasas, los cuales son el medio por el cual circula y se almacena el agua. Cabe señalar que tales fracturas tienen que estar abiertas o comunicadas entre sí para que el agua pueda circular.

- Acuíferos Kársticos: compuestos por rocas carstificadas como calizas, dolomías o yeso, donde la porosidad (huecos y cavernas) se desarrolla en forma secundaria, por disolución del carbonato. En este acuífero el agua circula entre los huecos cársticos de diámetros muy variables (canales, cavernas), a mayor velocidad que los acuíferos anteriores.



**Fig. 10.** a) Acuífero de poros, b) Acuífero de grietas, c) Acuífero kárstico. (Modificado de Werner, 1996).

Según Custodio & Llamas (1996); Werner (1996), la clasificación por sus características hidrodinámica es:

1. Acuíferos no confinados (acuíferos libres o freáticos), sin lecho confinante. En este acuífero el nivel freático libre es el límite superior del manto freático (o del acuífero en el sentido estricto). Existen una superficie libre del agua encerrada en ellos, que está en contacto directo con el aire y, por lo tanto, a presión atmosférica.
2. Acuíferos semiconfinados, representan un tipo hidrodinámico de transición, están confinados por capas semipermeables
3. Acuíferos confinados (cautivos o a presión), con lecho confinante, formado por capas de baja permeabilidad, el límite superior de estos acuíferos es el límite geológico entre el acuífero y la capa confinante (techo del acuífero). El agua de los mismos está sometida a una cierta presión, superior a la atmosférica, y ocupa la totalidad de los poros o huecos de la formación geológica que lo contiene, saturándola totalmente.

### **3.3.3 Conductividad hidráulica (K)**

La conductividad hidráulica, conocida también como el coeficiente de permeabilidad (K) depende de la composición granulométrica del acuífero de poros (gravas, arenas y mezclas de ambos, con adiciones de limos). La composición litológica de los acuíferos de poros se determina por estudios granulométricos. Para el cálculo de la conductividad hidráulica se desarrollaron métodos y fórmulas en base a curvas granulométricas cumulativas, obtenidas por análisis granulométricos de muestras de material tomadas del acuífero (Werner, 1996).

### **3.4 Química del agua**

La química del agua es la compilación de varias ciencias, que concierne al estudio de los procesos y reacciones químicas que afectan la distribución y circulación de especies disueltas en aguas naturales, combinada con la geología y la biología, debido a que durante el ciclo hidrológico el agua interactúa directamente con la Biosfera. La química del agua se centra en el estudio de los aspectos fisicoquímicos del agua y su relación con las rocas de la corteza terrestre, ya que al tener contacto roca – fluido se generan diversas reacciones químicas, como lo es la disolución de la roca (Sánchez – Sánchez, 2015).

La calidad del agua subterránea depende mucho de las condiciones del acuífero, de su litología, de su velocidad de circulación, de la calidad del agua infiltrada, de las relaciones con otras aguas o acuíferos y de las leyes del movimiento de sustancias transportadas por el agua. Las actividades humanas, ya sea a través de la producción de desechos y residuos, o a través de modificaciones en el régimen hidráulico del flujo en los acuíferos y en sus relaciones entre ellos y con otras aguas y formaciones, pueden producir contaminaciones cuyos alcances son a veces insospechados, las cuales se ven favorecidas en muchas ocasiones por el descuido, desconocimiento y, principalmente, por la falta de un adecuado control en la gestión del agua subterránea (Custodio & Llamas, 1996).

Un punto importante en los estudios químicos del agua es la evaluación de la contaminación del agua. Las aguas superficiales y subterráneas están sometidas a contaminación natural geológica (arrastre de material particulado y disuelto y presencia de materia orgánica natural) y de origen antrópico (descargas de aguas residuales domésticas, escorrentía agrícola, efluentes de procesos industriales, derrames y fugas de hidrocarburos, entre otros). La contaminación es la presencia de elementos o sustancias en concentraciones no deseables, tales que puedan afectar a la salud o al bienestar del ser humano o ser una amenaza para la naturaleza, es la modificación de las características físico – químicas del agua, debido a la intervención humana y que la inutilizan para un uso determinado (Díaz Delgado, et. al., 2005; Ortega – Guerrero, M.A., 2009).

### **3.4.1 Petróleo**

El Petróleo es un recurso natural no renovable, que se forma por la degradación anaerobia de los componentes orgánicos por largos periodos de tiempo y determinadas condiciones ambientales, está formado por una mezcla de varios hidrocarburos (parafínicos, aromáticos y naftalénicos). La composición de crudo es: Carbono 83- 87 %, Hidrógeno: 11-14 %, Oxígeno: 0-1%, Azufre: 0,2-5 %, Nitrógeno: 0-5 % y otros componentes en menor cantidad; estas proporciones varía según el yacimiento de donde se extrae el petróleo y la cantidad de grados API (medida de densidad). El grado API es la unidad de medida americana para representar la densidad del petróleo y sus

derivados, precisa cuan liviano o pesado es el petróleo. A mayor cantidad de grados API el crudo presenta mejor calidad (Gary, 1980; Gavilanez, 2013).

El petróleo es la fuente más importante de la energía del planeta donde gracias a este recurso natural mediante distintos procesos de refinación y producción se puede llegar a obtener gasolina y un sin número de combustibles, que permiten mover maquinas como automóviles, plantas eléctricas, etc.; también se puede producir asfaltos para la construcción de carreteras y un sin número de derivados necesarios en la vida diaria; por esta razón se recalca que es el recurso no renovable más importante a nivel internacional. Es el recurso más importante dentro de la economía ecuatoriana y no solamente debido a que es una fuente natural dentro del sector estratégico, sino también porque es una fuente de energía, trabajo y la principal fuente de ingresos del país (Torres, 2009).

Actualmente, uno de los problemas ambientales es la contaminación de ecosistemas terrestres por derrames de hidrocarburos, principalmente del petróleo y sus derivados, que ocurren en actividades de explotación y transporte de los mismos.

#### **3.4.1.2 Clasificación del petróleo**

El petróleo se clasifica acorde a la naturaleza química propia del crudo, su densidad en grados API, cuyo valor es determinado por el (American Petroleum Institute) y por su contenido de azufre, el cual lo hará que sea de un alto o bajo costo. El petróleo ligero es el crudo con bajo contenido de ceras que presenta una gravedad API mayor a 31,1 °; el crudo semi pesado presenta una gravedad API entre 22,3 y 31,1 °API; el crudo pesado es el que no fluye con facilidad debido a que su densidad o peso específico es superior a la del crudo semi pesado con una gravedad API inferior a 20 ° y el crudo extrapesado es el crudo que presenta una gravedad inferior a 10 ° API (Kraus, 2012).

Se denomina crudo dulce al petróleo que contiene menos del 0,5 % de azufre, mismo que contiene cantidades mínimas de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno, es procesado para hacer gasolina y tiene una gran demanda en las zonas industrializadas (Salvador & Fernández, 2012; Ingeniería Energética General, 2013).

### **3.4.2 Hidrocarburos**

Es un compuesto orgánico constituido principalmente por Carbono e Hidrógeno, el cual puede presentarse de manera líquida, sólida o gaseosa. Los alcanos son el componente más importante del petróleo, estos compuestos suelen ser reactivos químicos, explosivos o tóxicos. Se clasifican dependiendo al tipo de enlace que presenta la molécula de carbono dentro de las estructuras de los hidrocarburos (Autino, Romanelli, & Ruíz, 2013).

#### **3.4.2.1 Hidrocarburos totales policíclicos (HTP)**

Son una mezcla homogénea de hidrocarburos y se usan para describir una gran familia de varios componentes químicos tóxicos que se originan a partir del petróleo crudo y que pueden contaminar el ambiente. Debido a que hay muchos productos químicos en el petróleo crudo o refinado, no es práctico medir cada uno de estos componentes de forma separada; por ende, se mide la cantidad de hidrocarburos totales policíclicos (HTP) en un sitio determinado (Estrella, 2012).

#### **3.4.2.2 Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)**

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos, son hidrocarburos orgánicos de dos o más anillos bencénicos que constituyen una fracción importante del petróleo (Patel V, 2012), mismos que se encuentran alineados en forma angular o agrupada. La resonancia (distribución de electrones en los anillos aromáticos bencénicos) es la principal responsable para que estos compuestos sean resistentes a la oxidación tanto química como biológica proporcionándoles una elevada estabilidad, toxicidad y persistencia a este tipo de hidrocarburos (Izquierdo, 2013).

Los HAP son comúnmente generados por la combustión incompleta de la materia orgánica, de manera natural como antropogénica (incineración de residuos, automóviles, incendios forestales, etc.) (Thion, Beguiristain, & Leyval, 2013).

#### **3.4.2.3 Impactos ambientales en agua superficial y subterránea causados por derrames de hidrocarburos**

Los derrames de hidrocarburos son comunes durante los procesos de producción de crudo, así como también durante su comercialización, transporte y almacenamiento en

sitios de acopio y distribución como se ha mencionado en reiteradas ocasiones. Los derrames accidentales a gran escala presentan un volumen significativo de contaminantes en todo el mundo (Spier et al., 2013).

Sin embargo, este tipo de contaminación relacionada con sustancias derivadas del petróleo no tiene origen exclusivo en las actividades petroleras; la literatura permite conocer que existe un aporte masivo y continuo que proviene de labores diversas, tales como: la pesca; el transporte marítimo y de cabotaje; las operaciones de limpieza de buques y los expendios de combustible a embarcaciones pequeñas, cuyo suministro se realiza a través de mangueras, sin llave de cierre al final; el vertimiento de los residuos del cambio de aceite, las latas de lubricante en lanchas, y el descargue de sentinas de los buques pequeños caen directamente al agua (Jiménez, 2006).

De esta manera, se puede afirmar que no solo los grandes y reconocidos derrames mundiales son los que causan mayores daños ambientales; puesto que, día a día son innumerables las situaciones como las mencionadas por Jiménez (2006) las que se presentan sin ser catalogadas como desastres ambientales, pero que sí son acumulativas con el paso del tiempo y poco a poco generarán graves impactos. El aceite, por ejemplo, al ser un derivado del petróleo puede causar daños al medio ambiente a través de varios mecanismos, incluyendo la toxicidad asociada con la ingestión o absorción a través de las estructuras de la piel o respiratorias de la biota; revestimiento o asfixia, que afecta el intercambio de gases, regulación de la temperatura y el agotamiento del oxígeno por procesos microbianos asociados con la degradación del aceite (Mendelsohn et al., 2012).

Los derivados de hidrocarburos - gasolina, queroseno, aceites, combustibles, parafinas, y el asfalto, entre muchos otros - no solo impactan la capa superficial del suelo, también corren el riesgo de ser movilizados hasta aguas subterráneas generando así su contaminación, o incluso pueden ser transportados por escorrentía incrementado aún más el daño ambiental. Dicha contaminación afecta las condiciones fisicoquímicas de agua al presentarse una disminución de oxígeno disuelto debido a la reducción de la transferencia de oxígeno entre la fase atmósfera – agua, al igual que la entrada de luz al medio, lo que inhibe el crecimiento de ciertas especies y disminuye la fijación de

nutrientes. Uno de los efectos adicionales tanto en agua como suelos es que el petróleo consume oxígeno, aumenta la demanda bioquímica del agua y puede generar condiciones anóxicas (Jiménez. 2006).

Los cuerpos de agua como lagos, ríos y humedales ofrecen una variedad de recursos y comunidades acuáticas que pueden ser amenazadas por derrames de hidrocarburos. Los hidrocarburos tienden a flotar debido a la diferencia de densidad que presentan con respecto al agua, bloqueando de esta manera la penetración de la luz y el intercambio de gases. Adams et al. (2008) reportan que dicho bloqueo favorece la solubilización de materiales que afectan a las distintas poblaciones como el plancton o los microinvertebrados que viven en el fondo de ríos y pantanos. De igual forma, se reporta que la mayor parte de los componentes tóxicos y volátiles son eliminados por evaporación, mientras, otros se oxidan por la radiación UV en la luz del sol, todo esto depende del peso molecular, debido a que, algunos compuestos tóxicos de los hidrocarburos pueden disolverse en el agua y degradarse mientras otros presentan la capacidad de depositarse en los sedimentos. Cualquiera que sea la respuesta o acción de dichas sustancias la fauna y flora del lugar es la primera y directamente afectada (Mendelsohn et al. 2012).

### **3.4.3 Compuestos orgánicos volátiles (COV): benceno, tolueno, etilbenceno, m/p – xileno y o – xileno (BTEX).**

Los BTEX son uno de los grupos principales de los compuestos orgánicos solubles que se encuentran en el suelo y en el agua subterránea. La fuente más común para la contaminación por BTEX son los derrames de productos de petróleo tales como la gasolina, diésel, lubricantes y aceites producto de filtraciones de los tanques de almacenamiento. Debido a sus características de polaridad y solubilidad, los BTEX son capaces de entrar en el suelo y en el agua subterránea y causar serios problemas de contaminación (Christensen & Elton, 1996).

El grupo de contaminantes BTEX consiste de Benceno, Tolueno, Etilbenceno y tres isómeros de Xileno (meta, para y orto - Xileno). Estas sustancias orgánicas representan un porcentaje significativo de los productos derivados de petróleo. La razón por la que son considerados un serio problema es porque todos ellos tienen efectos tóxicos agudos

y crónicos, además se conoce que el Benceno es cancerígeno (Christensen & Elton, 1996).

Los BTEX son un subproducto de la destilación del petróleo, excepto el etilbenceno (derivado del estireno) cuyos usos más comunes son: plásticos, resinas, disolventes de pinturas, colas, barnices y tintas de imprenta; como aditivo en gasolinas y en síntesis de compuestos orgánicos.

### **3.4.3.1 Características, usos, daños a la salud y efectos ambientales del benceno, tolueno, etilbenceno, m/p – xileno y o – xileno (BTEX).**

El **benceno** se utiliza generalmente como un disolvente, pero actualmente se emplea como materia prima para la síntesis de otros químicos. El porcentaje de benceno en la gasolina está entre 1 % y 2 % vol.

*Usos:* Del grupo de BTEX, industrialmente el benceno es el más importante. Se utiliza como base para la fabricación de caucho sintético, colorantes, plásticos, pinturas, resinas, agentes desengrasantes, materias primas para detergentes y se utiliza ampliamente como disolvente.

*Daños a la salud:* El benceno puede generar varios efectos de toxicidad, irritación de ojos y las vías respiratorias. También puede causar temporalmente desordenes en el sistema nervioso y anemia. De acuerdo a las Directrices de evaluación de riesgos de 1986, el benceno es clasificado como carcinógeno humano "conocido" (Categoría A). En 1998, la Agencia Internacional para la Investigación de Carcinógenos encontró que "*Hay suficiente evidencia de que el benceno es carcinogénico para el hombre*". Según las Directrices revisadas de evaluación de riesgos de carcinogénesis, el benceno se caracteriza como un carcinógeno humano conocido para todas las vías de exposición según la evidencia epidemiológica convincente de una asociación causal entre la exposición humana y el cáncer (Escobar, C., 2003; U.S. EPA., 2013).

*Efectos ambientales:* Cuando el benceno está cerca de la superficie del suelo se volatiliza rápidamente. Si este no se evapora puede migrar fácilmente y depositarse en aguas subterráneas generando un impacto negativo (Escobar, C., 2003; U.S. EPA., 2013). La OMS, estimó que en los EE. UU aproximadamente el 1.3 % de todos los sistemas de

agua subterránea contenían benceno a concentraciones superiores a 0.5 µg/L (el nivel más alto reportó 80 µg/L) para abastecimientos de agua potable.

El **tolueno** se emplea en la formulación de pinturas, lacas, tinner y agentes de limpieza, pegamentos, y en muchos otros productos. El tolueno también se utiliza en la producción de otros químicos. La gasolina contiene del 5 % al 7 % vol. de tolueno.

*Usos:* El tolueno es un componente petroquímico líder (utilizado principalmente en la producción de benceno, p xileno, diisocianato de tolueno [TDI], ácido benzoico y otros compuestos) y también se utiliza como solvente para pinturas, gomas, resinas y como aditivo de la gasolina (Escobar, C., 2003; U.S. EPA., 2013).

*Daños a la salud:* El tolueno causa daños en la salud por ingestión oral en el sistema nervioso central (SNC), también produce daños en la piel y las membranas mucosas; su acción secante y desengrasante puede provocar una dermatitis grave. Otros efectos incluyen toxicidad renal (riñón), arritmias cardíacas, discrasias sanguíneas, agrandamiento del hígado, problemas de memoria y dificultad al hablar (Escobar, C., 2003; U.S. EPA., 2013).

*Efectos ambientales:* Al igual que el benceno el tolueno en el suelo puede evaporarse o infiltrarse y depositarse en aguas superficiales y subterráneas. Éste puede entrar al agua mediante derrames de solventes y productos de petróleo, como también por escapes de tanques subterráneos en gasolineras, generando la contaminación de los acuíferos. La biodegradación ocurre en ambos suelos y agua subterránea. La presencia de poblaciones microbianas ayuda a la rápida biodegradación (Montanez, Aleyda et. al., 2009; Escobar, C., 2003; U.S. EPA., 2013).

El **etilbenceno** es un líquido inflamable, incoloro, de olor similar a la gasolina. Se le encuentra en productos naturales tales como carbón y petróleo, como también en productos de manufactura como tinturas, insecticidas y pinturas.

*Usos:* La mayor parte del etilbenceno se utiliza como precursor en la producción de estireno, pero también se utiliza como disolvente, materia prima para otras producciones químicas y como componente de la gasolina. Otros usos incluyen solvente en pinturas, en la producción de pegantes sintéticos y acetato de celulosa.

*Daños a la salud:* Las exposiciones agudas al etilbenceno se han asociado con varios efectos que incluyen irritación de los ojos, somnolencia, fatiga, daños en las vías respiratorias, narcosis y dolor de cabeza. Las exposiciones crónicas y a largo plazo pueden provocar ototoxicidad (efectos sobre la audición), toxicidad general del desarrollo, alteraciones celulares y daños en el hígado, toxicidad testicular y nefrotoxicidad (Escobar, C., 2003; U.S. EPA., 2013).

*Efectos ambientales:* El etilbenceno es detectado con poca frecuencia en ríos, lagunas y manantiales usados como fuentes de agua potable. Es posible encontrar niveles más altos de etilbenceno en manantiales privados cerca de vertederos, sitios de desechos, o de tanques de almacenamiento subterráneos que tienen fugas. A su vez, el etilbenceno puede movilizarse al agua subterránea a través del suelo (Montanez, Aleyda et. al., 2009).

Los **xilenos** (*m - xileno*, *p - xileno* y *o - xileno*) son buenos disolventes y se usan como tales. Además, forman parte de muchas formulaciones de combustibles de gasolina donde destacan por su elevado índice octano. Aproximadamente la suma de xilenos en los combustibles está entre el 6 % y 8 % en volumen.

*Usos:* Se utilizan principalmente como solventes. Como isómeros individuales se utilizan como materia prima en la fabricación de productos químicos con una amplia gama de productos finales asociados con cada isómero.

*Daños a la salud:* La exposición aguda por inhalación a xilenos mixtos puede causar problemas respiratorios e irritación de la nariz y la garganta; efectos gastrointestinales como náuseas, vómitos y malestar gástrico; irritación ocular leve y transitoria; y efectos neurológicos como deterioro de la memoria a corto plazo, deterioro del tiempo de reacción, disminución de la capacidad numérica y alteraciones en el equilibrio corporal (Escobar, C., 2003; U.S. EPA., 2013).

*Efectos ambientales:* El xileno es muy volátil, en ríos tiene una vida media de 29 a 144 horas respectivamente. En los suelos son moderadamente móviles y pueden infiltrarse hacia el agua subterránea, donde persisten por varios años, generando contaminación

en los acuíferos. A pesar de esto pueden biodegradarse en agua y suelos (U.S. EPA., 2013).

#### **3.4.4 Gasolina**

Es una mezcla de hidrocarburos líquida muy volátil, fácilmente inflamable, obtenida del petróleo fraccionada, que se utiliza principalmente como combustible en motores de combustión interna, también tiene usos en lámparas, estufas, limpieza con solventes y otras aplicaciones (Hatzioannidis et al., 1998).

Los componentes de una gasolina se pueden clasificar en (American Petroleum Institute, 2001):

- Parafinas: hidrocarburos que corresponden a la fórmula  $C_nH_{2n+2}$ , la más sencilla de ellas es el metano ( $CH_4$ ).
- Iso Parafinas, son hidrocarburos similares a los anteriores pero su estructura presenta una ramificación, su fórmula es  $C_nH_{2n+2}$ , el iso butano ( $CH_3-CH-CH_3-CH_3$ ), es el más simple de estos hidrocarburos.
- Aromáticos, el hidrocarburo representativo de estas especies es el benceno, cuya fórmula condensada es  $C_6H_6$ , es decir,  $C_nH_n$ .
- Nafténicos, corresponden a las ciclo parafinas, la más simple es el ciclo propano ( $C_3H_6$ ). Son parafinas de anillo cerrado en las cuales cada átomo de carbono está unido dos átomos de hidrógeno, su fórmula condensada es  $C_nH_{2n}$ .
- Olefinas, presentan la fórmula  $C_nH_{2n}$ , la más simple es el etileno ( $C_2H_4$ ), se caracteriza por tener los átomos de carbono unidos por un doble enlace.

#### **3.5 Cromatografía de gases**

En cromatografía de gases (GC), la muestra se volatiliza y se inyecta en la cabeza de una columna cromatográfica. La elución se produce por el flujo de una fase móvil de un gas inerte, y a diferencia de la mayoría de los tipos de cromatografía, la fase móvil no interacciona con las moléculas del analito; su única función es la de transportar el analito a través de la columna (Dabrio, 1971)

Existen dos tipos de cromatografía de gases: la cromatografía gas-sólido (GSC) y la cromatografía gas-líquido (GLC). La cromatografía gas - líquido tiene gran aplicación en todos los campos de la ciencia y su denominación se abrevia normalmente como cromatografía de gases (GC; Dabrio, 1971).

La cromatografía gas - sólido se basa en una fase estacionaria sólida en la cual se produce la retención de los analitos como consecuencia de la adsorción física.

La cromatografía gas - líquido se basa en la distribución del analito entre una fase móvil gaseosa y una fase líquida inmovilizada sobre la superficie de un sólido inerte.

### **3.5.1 Cromatógrafo de gases**

Según Guntuzweiny, J.S. (2000) un cromatógrafo de gases consiste en varios módulos básicos ensamblados para:

- 1) Proporcionar un gasto o flujo constante del gas transportador (fase móvil).
- 2) Permitir la introducción de vapores de la muestra en la corriente de gas que fluye.
- 3) Contener la longitud apropiada de fase estacionaria.
- 4) Mantener la columna a la temperatura apropiada (o la secuencia del programa de temperatura).
- 5) Detectar los componentes de la muestra conforme eluyen de la columna.
- 6) Proveer una señal legible proporcional en magnitud a la cantidad de cada componente.

Componentes fundamentales de un cromatógrafo de gases:

- 1) Fase móvil.
- 2) Puerto de inyección.
- 3) Horno de la columna.
- 4) Válvulas.
- 5) Columnas.
- 6) Fase estacionaria.
- 7) Detector.
- 8) Sistema de registro de datos.

### **3.5.2 Sistemas de inyección de muestra**

Los dispositivos de inyección de muestras para cromatografía de gases tienen la misión de vaporizar la muestra a analizar e incorporarla a la corriente de gas portador que se dirige hacia la columna (Jennings, W., 1987). La vaporización e introducción de las muestras en el sistema, debe realizarse cumpliendo una serie de requisitos:

- 1) La vaporización de la muestra debe ser lo más rápida posible.
- 2) La vaporización debe realizarse sin discriminar ningún componente de la muestra.
- 3) La muestra debe llegar a la columna como una banda fina posible.

### **3.5.3 Inyectores para columnas**

- Columnas empaquetadas.

La inyección de muestras en columnas empaquetadas no presenta problemas particulares: este tipo de columnas admiten cantidades de muestra relativamente elevadas, y la inyección de unos cuantos microlitros de muestra no conduce a una merma apreciable de la eficacia de la columna (Dabrio, 1971).

- Columnas capilares.

Los sistemas de introducción de muestras utilizados para trabajar con columnas capilares están basados sobre los mismos principios de los inyectores utilizados para columnas empaquetadas, por lo que las consideraciones generales sobre ellos siguen siendo las mismas (Dabrio, 1971).

La diferencia fundamental entre los sistemas que utilizan columnas empaquetadas y los que utilizan columnas capilares, radican en que la cantidad de muestra que estas últimas pueden separar es mucho menor que en el primer caso (Dabrio, 1971).

### **3.5.4 Detector de ionización de llama (FID)**

El detector de ionización de llama (FID) es el detector más extensamente utilizado, y por lo general, uno de los más aplicables en cromatografía de gases. En un quemador el efluente de la columna se mezcla con H<sub>2</sub> y aire para luego encenderse eléctricamente. En el FID, el efluente (gas) procedente de la columna se mezcla con hidrógeno y esta

mezcla se quema eléctricamente en una cámara con exceso de aire. Por encima de la llama, se dispone un colector cilíndrico polarizado con el fin de recoger los iones generados; sobre este dispositivo se mide la corriente iónica que se establece entre la punta del quemador y el electrodo colector. Se aplica una diferencia de potencial entre el extremo del quemador y un electrodo colector situado encima de la llama. Al final ionizamos los compuestos que contienen carbono de manera que los iones producidos son aproximadamente igual al de los átomos de carbono transformados en la llama (Wilson, H.W. & M.S. Klee, 1997).

Características generales:

- 1) El detector más usado y de más aplicación.
- 2) De respuesta universal porque sirve para todos los compuestos orgánicos (para todos los compuestos que presenten enlaces C – H susceptibles a ser quemados.
- 3) El detector es insensible a los gases no combustibles como H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> por eso es tan usado para analizar los Compuestos Orgánicos contaminados con agua, óxidos de nitrógeno y azufre.
- 4) Elevada sensibilidad.
- 5) Es resistente y fácil de usar.
- 6) La calidad de los gases, portados y de combustión, no es tan crítica.

# CAPÍTULO 4: **METODOLOGÍA**

## Capítulo 4: METODOLOGÍA

La elaboración del presente trabajo se realizó en las siguientes etapas: trabajo de campo, trabajo de gabinete, análisis en laboratorio, procesamiento e interpretación de los resultados. En la Figura 11, se encuentra representado de manera general el diagrama metodológico que se llevó a cabo.

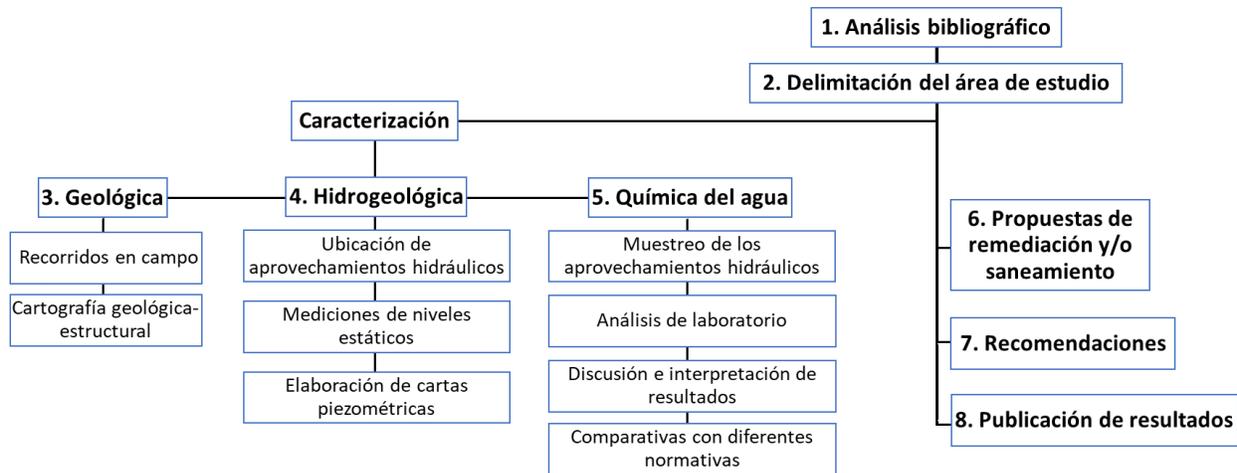


Fig. 11. Diagrama metodológico en general.

### 4.1 Análisis bibliográfico

A lo largo de la investigación se consultó distinta bibliografía relacionada con el tema de investigación, esto para enriquecer dicho proyecto y darle una mayor credibilidad. Se consultaron: libros especializados, tesis, artículos científicos en revistas nacionales e internacionales, entre otros.

### 4.2 Delimitación del área de estudio

Con base al programa informático Google Earth se procedió a ubicar espacialmente las posibles fuentes de contaminación, a partir de ello se delimitó la zona de estudio.

### 4.3 Caracterización geológica

#### 4.3.1 Recorridos en campo

Teniendo el área de estudio delimitada, se comenzó a realizar salidas a campo para la identificación de la estructura geológica presente en la zona de estudio, para ello se

utilizaron cartas topográficas, geológicas, cámara y un kit de equipo geológico (lupa, brújula y pica).

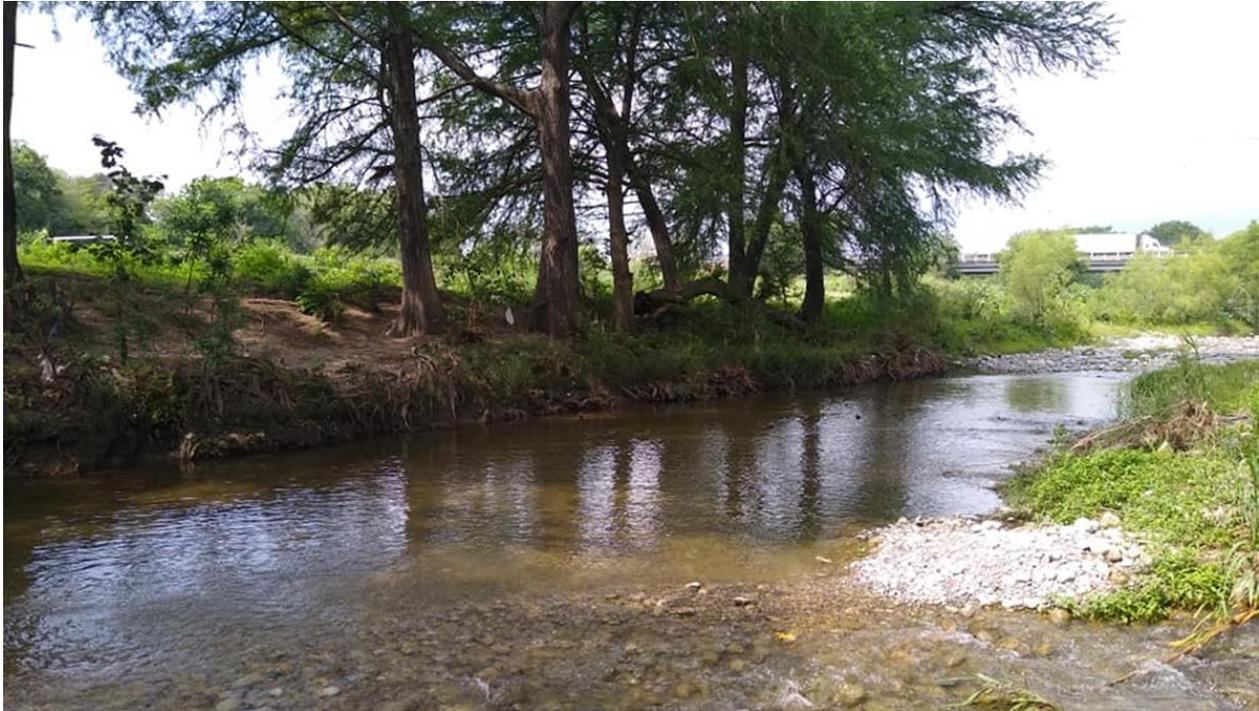
#### **4.3.2 Cartografía geológica**

Se llevó a cabo la cartografía geológica sobre el lecho del río Camacho (Figura 12), esto para identificar el macizo rocoso que se encuentra aflorando en la zona de estudio, dando principalmente un valor primordial a su conductividad hidráulica, dicho parámetro es posible evaluarse partiendo de la observación directa de su composición geológica y el estado tectónico que presentan los afloramientos a estudiar. De igual manera, se procedió a la identificación de las terrazas que se encuentran aflorando en la zona de estudio.

Sobre el lecho del río Camacho se encuentra aflorando la Formación Méndez, la cual es de mayor importancia en la zona de estudio, físicamente no es posible la toma de datos estructurales en los estratos que se encuentran aflorando sobre el lecho del río Camacho, ya que se encuentran sumergidos, es por ello que se optó por visitar “El Cerrito”, sitio ubicado en las partes altas de Linares el cual presenta estratos muy bien definidos pertenecientes a la Formación Méndez con intercalaciones de areniscas. Con base a la toma de datos estructurales fue posible lograr una correlación con los estratos geológicos que se encuentran sumergidos a lo largo del río Camacho.

La importancia del estudio de la Formación Méndez tiene su origen en que es aquí donde se encuentra el acuífero de grietas de la ciudad industrial de Linares, el cual es de gran importancia ya que de este se hace un gran uso del agua para todo tipo. Dicha Formación presenta un grado alto de fracturamiento, lo cual genera un grado alto de conductividad hidráulica, permitiendo una fácil infiltración al agua subterránea de los diferentes contaminantes con lo que se tiene contacto.

Se localizaron afloramientos que permitieran la medición de elementos tectónicos (diaclasas, fallas). Las mediciones fueron realizadas empleando una brújula Brunton y los datos fueron almacenados para su posterior análisis. Una vez que los afloramientos fueron medidos se procedió al análisis geológico/estructural de las mediciones tomadas de rumbo y buzamiento mediante el programa Stereonet.



**Fig. 12.** Río Camacho (2020).

## **4.4 Caracterización Hidrogeológica**

### **4.4.1 Ubicación de aprovechamientos hidráulicos**

Teniendo el área de estudio delimitada, se procedió a realizar salidas a campo en búsqueda de aprovechamientos hidráulicos que pudieran servir para medición y muestreo a lo largo de la investigación. Para ello, se utilizó como apoyo el programa informático Google Earth para ubicar espacialmente sitios que contaran con posibles sitios de muestreo. Los recorridos en campo consistieron en ubicar, identificar, clasificar y seleccionar los aprovechamientos hidráulicos más cercanos a los posibles focos de contaminación, cabe destacar que todos los aprovechamientos seleccionados como sitios de medición y muestreo son de agua subterránea, se dividieron entre pozos y norias. En la Tabla 1, se muestran las generalidades de cada uno de los sitios de muestreo y en la Figura 13, se muestra la ubicación espacial de cada aprovechamiento hidráulico.

Tabla 1. Datos generales de los aprovechamientos hidráulicos dentro de la zona de estudio.

Número de pozo	ID del pozo	Nombre del pozo	Coordenadas (E) Longitud	Coordenadas (N) Latitud	Estado del pozo
1	PCI 1	Pozo Estatuas	441112	2751489	Estático
2	PCI 2	Pozo Río (Noria)	442287	2751902	Estático
3	PCI 3	Pozo SIGMA (Noria)	441864	2752499	Estático
4	PCI 4	Pozo la Borrada	439863	2753001	Estático
5	PCI 5	Pozo Veracruz	439009	2752539	Estático
6	PCI 6	Pozo Ejido Alejandro	439594	2751410	Estático
7	PCI 7	Pozo SEDEC	441002	2751741	Estático
8	PCI 8	Pozo Bomberos	440877	2751834	Estático
10	PCI 10	Pozo CECyTE	441107	2751973	Estático
11	PCI 11	Pozo PEMEX Rebombeo	440212	2752232	Estático
12	PCI 12	Pozo Tec. Linares	439966	2752210	Estático
13	PCI 13	Pozo PEMEX (Noria)	440074	2752381	Estático
14	PCI 14	Pozo Casa Verde	440664	2752068	Estático

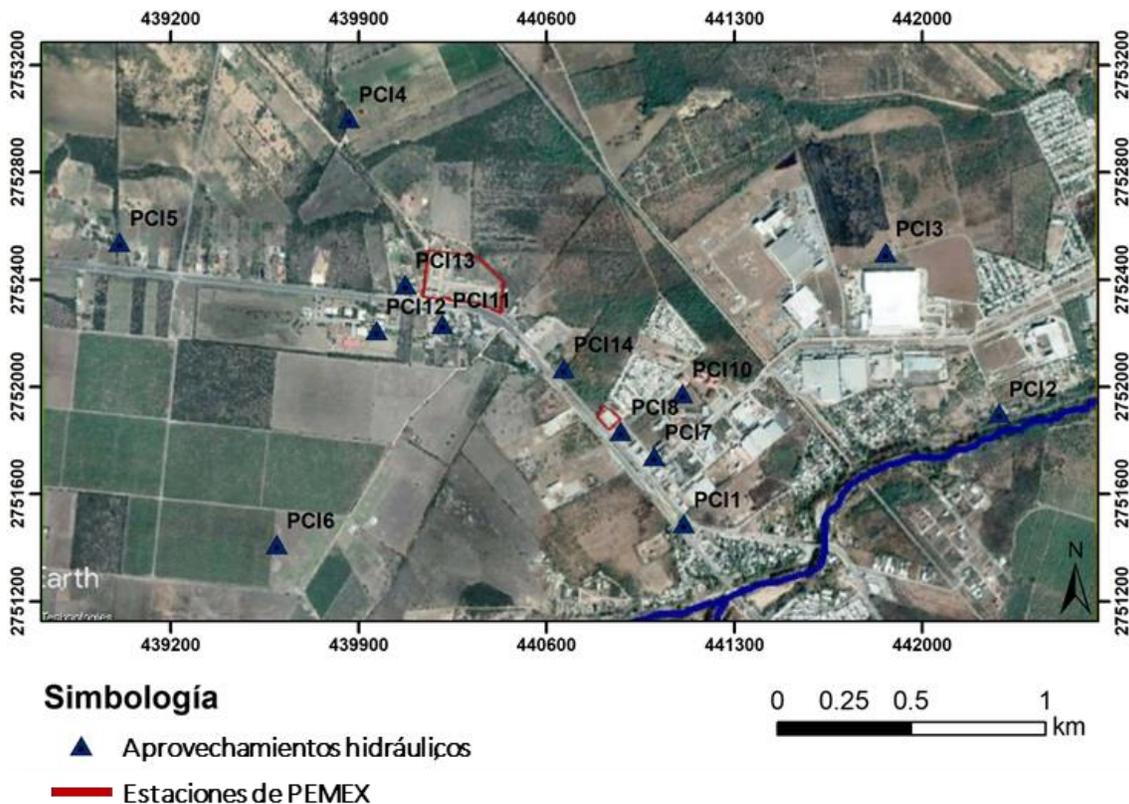


Fig. 13. Aprovechamientos hidráulicos en zona de estudio. (Elaboración propia, con imagen de Google Earth, 2021).

#### 4.4.2 Cartas piezométricas

La superficie piezométrica es el lugar exacto de los puntos que señalan la altura piezométrica de cada una de las partes de un acuífero pertenecientes a una determinada profundidad. La única forma disponible para obtener los niveles piezométricos es medir éstos en un pozo. Las cartas piezométricas proporcionan información importante tal como la configuración espacial de un acuífero, las direcciones y los gradientes hidráulicos del flujo del agua subterránea, así como el estado de explotación del agua por actividades humanas (Custodio & Llamas, 1996; Werner, 1996).

Para la elaboración de las cartas piezométricas de la zona de estudio, primeramente, se tomó la geoposición (UTM) de cada aprovechamiento hidráulico, así como la elevación del terreno (m s. n. m.), cabe mencionar que ambas lecturas fueron tomadas con un sistema de posicionamiento global (GPS) marca GARMIN – OREGON 450 (Figura 14), los m s. n. m. fueron verificados con un archivo LIDAR.



**Fig. 14.** GPS Marca GARMIN - OREGON 450.  
**Tomada de:** Ficha técnica GARMIN – OREGON 450.

Los niveles estáticos del agua subterránea son datos necesarios para la elaboración de la carta piezométrica, para ello, se tomaron los niveles estáticos de cada aprovechamiento hidráulico. Se utilizó una sonda acústica Solinst Modelo 107 (Figura 15) para realizar dichas mediciones, cabe mencionar que la sonda se encontraba previamente calibrada. El procedimiento para la medición de los niveles estáticos de cada aprovechamiento consistió en introducir el cable de la sonda al aprovechamiento próximo a medir (Figura 16), la parte superior de la sonda cuenta con un electrodo, el cual al tener contacto con el agua emite una señal indicando la presencia del fluido. Al momento exacto en que la sonda emite la señal se toma la distancia alcanzada por el

cable, dicha medición nos indica la distancia que existe desde la superficie hasta el nivel freático, la distancia registrada es el valor de nuestro nivel estático.



**Fig. 15.** Sonda Solinst – TLC: Temperatura, Nivel, Conductividad, Modelo 107.



**Fig. 16.** Medición de niveles estáticos, 2021.

Los datos necesarios para la elaboración de la carta piezométrica son: elevación del terreno (m s. n. m.), nivel estático y el nivel piezométrico, este último es resultado de la diferencia entre la elevación del terreno y el nivel estático (Tabla 2).

Tabla 2. Datos necesarios para la elaboración de una carta piezométrica (mediciones tomadas en temporada de sequía – noviembre 2020).

Número de pozo	ID del pozo	Nombre del pozo	Altura brocal (m s. n. m.)	Nivel estático (m s. n. m.)	Nivel piezométrico (m s. n. m.)
1	PCI 1	Pozo Estatuas	342	7.8	334.2
2	PCI 2	Pozo Río (Noria)	340	6.3	333.7
3	PCI 3	Pozo SIGMA (Noria)	341	10.0	331.0
4	PCI 4	Pozo la Borrada	370	20.2	349.8
5	PCI 5	Pozo Veracruz	362	18.7	343.3
6	PCI 6	Pozo Ejido Alejandro	350	15.2	334.8
7	PCI 7	Pozo SEDEC	342	10.9	331.1
8	PCI 8	Pozo Bomberos	348	12.0	336.0
10	PCI 10	Pozo CECyTE	345	11.0	334.0
11	PCI 11	Pozo PEMEX Rebombeo	353	13.0	340.0
12	PCI 12	Pozo Tec. Linares	356	14.9	341.1
13	PCI 13	Pozo PEMEX (Noria)	359	14.5	344.5
14	PCI 14	Pozo Casa Verde	350	12.9	337.1

La elaboración de la carta piezométrica digital fue elaborada mediante el programa digital ArcMap 10.3, se utilizó el método de interpolación tomando los datos piezométricos y las coordenadas espaciales (UTM) de cada aprovechamiento hidráulico. Con base a los niveles piezométricos se generaron las isolíneas piezométricas mediante la herramienta “Contour”. Las direcciones de flujo del agua subterránea fueron incorporadas individualmente utilizando la herramienta “Edit – Polyline”. Los detalles finales fueron realizados en modo “Lay Out View”.

Se elaboraron cuatro cartas piezométricas correspondientes a las mediciones tomadas en los meses de: agosto (2020), noviembre (2020), febrero (2021) y mayo (2021).

## 4.5 Caracterización Química del Agua

### 4.5.1 Muestreo de agua

Para la realización de la campaña de muestreo de aguas subterráneas fueron empleados en campo diferentes materiales y equipos como los que se describen a continuación: Muestreadores elaborados propiamente con tubo PVC de un diámetro de 1 ½" y de 2",

a éstos muestreadores se les acopló un arnés y una cuerda para poder introducirlos a los diferentes aprovechamientos hidráulicos, recipientes de polietileno de 125 y 750 mL, envases de vidrio ámbar de 1 L, gotero con ácido nítrico y gotero con ácido sulfúrico, piseta, guantes, pipeta graduada, fichas de campo, cinta adhesiva, plumón indeleble, etiquetas, diario, tijera, hielera, hielo, agua destilada, agua común, aluminio, guantes, papel Parafilm, cubrebocas, careta, bolsas negras, aluminio, papel secante, cámara fotográfica, entre otros.

El monitoreo y muestreo constituyen el primer paso para la determinación de la calidad de una fuente de agua, por lo que la colecta de muestras debe ser realizada aplicando el procedimiento que se menciona en la Norma Oficial Mexicana NOM 014-SSA1-1993, la cual describe los "Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados". En este sentido se asegura que la muestra es representativa de la fuente cuya calidad se desea evaluar, y que no se deteriora, ni se contamina antes de llegar al laboratorio, ya que la calidad de los resultados depende de la integridad de las muestras que ingresan al mismo.

De acuerdo con la SEMARNAT (2010), las muestras deben ser representativas de las condiciones que existan en el sitio seleccionado y deben tener el volumen suficiente para efectuar las determinaciones correspondientes. En caso de muestras tomadas en pozos dinámicos, se debe dejar fluir el líquido durante al menos diez minutos, antes de la toma de muestra.

#### **4.5.2 Toma de muestras**

De cada aprovechamiento hidráulico se tomaron 4 muestras de agua subterránea: 2 muestras fueron recolectadas en recipientes de 750 mL, una muestra en un recipiente de 125 mL y la última fue recolectada en envases de 1 L, procurando la eliminación de burbujas; a uno de los recipientes de 750 mL se le añadió cinco gotas de ácido sulfúrico esto con el objetivo de inhibir bacterias; el agua muestreada del recipiente de 125 mL se le adicionaron 5 gotas de ácido nítrico para disminuir el pH a menos de 2 unidades (Figura 17). Además, se realizó el etiquetado con datos de identificación de la muestra y datos generales como fecha y número de muestra. Aunado a lo anterior fue llenada una

ficha de campo con datos generales del sitio de muestreo, así como características observadas en campo de cada aprovechamiento (Tabla 3).

Las muestras colectadas y preservadas con los inhibidores correspondientes fueron colocadas en posición vertical en hieleras de plástico para ser almacenadas y preservadas en hielo a 4°C. Una vez terminado el muestreo, fueron transportadas al Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería Civil/UANL. Ya ubicadas las muestras en el laboratorio (Figura 18) fueron colocadas inmediatamente dentro de refrigeradores donde fueron conservadas hasta el momento de su análisis considerando no sobrepasar el tiempo de almacenamiento recomendado por la Secretaría de Salud y fijado en la norma oficial mexicana NOM-230 SSA1 2002, que establece los requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Las muestras tomadas en campo en recipientes de 125 mL preservadas con HNO<sub>3</sub> fueron enviadas al laboratorio de análisis del área Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí para realizar las determinaciones correspondientes.



**Fig. 17.** Toma de muestra con base a la NOM 014-SSA1-1993.

Tabla 3. Toma de muestras de los diferentes aprovechamientos hidráulicos con base en la NOM 014-SSA1-1993.

 <p><b>Nombre del pozo:</b> Pozo Estatuas.  <b>ID del pozo:</b> PCI 1.  <b>Fecha de muestreo:</b> 16/11/2020.  <b>Estado:</b> Estático.  <b>Tipo de aprovechamiento:</b> Pozo.  <b>Observaciones:</b> Presentó un ligero olor y coloración a hidrocarburo, dicho pozo se encuentra aguas abajo, esta cercano al cauce del río Camacho.</p>	 <p><b>Nombre del pozo:</b> Pozo Río.  <b>ID del pozo:</b> PCI 2.  <b>Fecha de muestreo:</b> 16/11/2020.  <b>Estado:</b> Estático.  <b>Tipo de aprovechamiento:</b> Noria.  <b>Observaciones:</b> Noria ubicada a unos cuantos metros del cauce del río, tiene recarga inmediata. A unos cuantos metros pasan las descargas residuales de la planta de alimentos SIGMA.</p>
 <p><b>Nombre del pozo:</b> Pozo SIGMA.  <b>ID del pozo:</b> PCI 3.  <b>Fecha de muestreo:</b> 16/11/2020.  <b>Estado:</b> Estático.  <b>Tipo de aprovechamiento:</b> Noria.  <b>Observaciones:</b> Noria ubicada dentro de la ciudad industrial, el agua se encuentra muy turbia y sucia. Presento un olor extraño.</p>	 <p><b>Nombre del pozo:</b> Pozo la Borrada.  <b>ID del pozo:</b> PCI 4.  <b>Fecha de muestreo:</b> 16/11/2020.  <b>Estado:</b> Estático.  <b>Tipo de aprovechamiento:</b> Pozo.  <b>Observaciones:</b> Pozo anteriormente usado para riego, no presentó olor ni color extraño. Según comentarios de los propietarios el nivel estático ha disminuido considerablemente en los últimos años.</p>



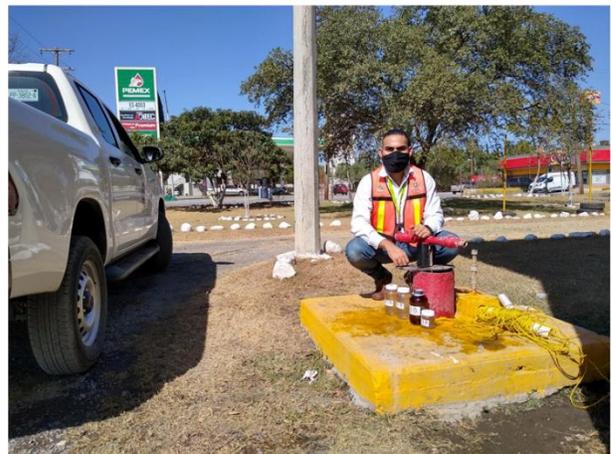
**Nombre del pozo:** Pozo Veracruz.  
**ID del pozo:** PCI 5.  
**Fecha de muestreo:** 16/11/2020.  
**Estado:** Estático.  
**Tipo de aprovechamiento:** Pozo.  
**Observaciones:** Pozo ubicado aguas arriba en la zona de estudio, anteriormente se utilizaba para riego. No presentó olor o coloración anómala.



**Nombre del pozo:** Pozo Ejido Alejandro.  
**ID del pozo:** PCI 6.  
**Fecha de muestreo:** 16/11/2020.  
**Estado:** Estático.  
**Tipo de aprovechamiento:** Pozo.  
**Observaciones:** Pozo ubicado en zona de huertas, dicho pozo se encuentra estático pero a sus alrededores se ubican otros pozos equipados de los cuales se extrae agua para riego.



**Nombre del pozo:** Pozo SEDEC.  
**ID del pozo:** PCI 7.  
**Fecha de muestreo:** 16/11/2020.  
**Estado:** Estático.  
**Tipo de aprovechamiento:** Pozo.  
**Observaciones:** Presentó una coloración verdosa, el agua se encontraba muy sucia. Se percibió olor a hidrocarburo. Se encontró mucha presencia de material suspendido color rojizo. La ubicación del pozo se encuentra muy cercana a la gasolinería.



**Nombre del pozo:** Pozo Bomberos.  
**ID del pozo:** PCI 8.  
**Fecha de muestreo:** 16/11/2020.  
**Estado:** Estático.  
**Tipo de aprovechamiento:** Pozo.  
**Observaciones:** Pozo ubicado a unos cuantos metros de la gasolinería, presentó gran olor a hidrocarburo y una tonalidad verdosa, el agua se encontró turbia.



**Nombre del pozo:** Pozo CECyTE.  
**ID del pozo:** PCI 10.  
**Fecha de muestreo:** 16/11/2020.  
**Estado:** Estático.  
**Tipo de aprovechamiento:** Pozo.  
**Observaciones:** Pozo ubicado dentro de las instalaciones del CECyTE, presentó coloración de una tonalidad blanca, se pudo percibir un ligero aroma a hidrocarburo.



**Nombre del pozo:** Pozo Tec. Linares.  
**ID del pozo:** PCI 12.  
**Fecha de muestreo:** 16/11/2020.  
**Estado:** Estático.  
**Tipo de aprovechamiento:** Pozo.  
**Observaciones:** Pozo ubicado dentro de las instalaciones del Tecnológico de Linares, presentó un agua con una tonalidad de color blanca.



**Nombre del pozo:** Pozo PEMEX.  
**ID del pozo:** PCI 13.  
**Fecha de muestreo:** 16/11/2020.  
**Estado:** Estático.  
**Tipo de aprovechamiento:** Noria.  
**Observaciones:** Noria ubicada a unos cuantos metros de la central de rebompeo de PEMEX, presentó gran olor a hidrocarburo y una ligera coloración verdosa.



**Nombre del pozo:** Pozo Casa Verde.  
**ID del pozo:** PCI 14.  
**Fecha de muestreo:** 16/11/2020.  
**Estado:** Estático.  
**Tipo de aprovechamiento:** Pozo.  
**Observaciones:** Pozo ubicado dentro de una vivienda, anteriormente se utilizaba para uso doméstico. Presentó agua turbia con material particulado.



**Fig. 18.** Muestras de agua subterránea tomadas en campo para análisis de laboratorio, 2020.

### **4.5.3 Determinación de parámetros fisicoquímicos**

Para identificar la naturaleza de las aguas subterráneas que están presentes en la zona de estudio, se realizaron diferentes determinaciones para cada una de las muestras tomadas en campo de cada aprovechamiento hidráulico que se tienen como sitio de muestreo. Cada muestra fue sometida a diferentes pruebas de laboratorio para poder identificar principalmente las familias de aguas que se tienen presentes, así como la presencia de contaminación antropogénica resultado de la actividad petrolera (específicamente BTEX) que se lleva a cabo en la zona de estudio.

Cabe mencionar que durante el desarrollo de la investigación se realizó una campaña de muestre en temporada de sequía, período en donde las condiciones de estabilidad química son óptimas, en la cual se muestrearon 13 aprovechamientos hidráulicos (pozos y norias). Todo el muestro se realizó aplicando el procedimiento que se menciona en la Norma Oficial Mexicana NOM-014-SSA1-1993.

#### **4.5.3.1 Determinación de parámetros fisicoquímicos in situ**

Como parte importante del protocolo implementado en el trabajo de campo, está la medición de parámetros de campo con el objetivo de que dichas mediciones permitan establecer las condiciones originales de la muestra de agua subterránea en el momento de su extracción del subsuelo o captación en la superficie. Para la medición de los parámetros de campo se utilizó una sonda acústica Solinst Modelo 107. Cabe mencionar que se realizaron 4 mediciones en diferente temporada: sequía, ordinario y lluvia.

##### **4.5.3.1.1 Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica indica la facilidad de transmisión de una corriente eléctrica, proceso que en el caso de una solución acuosa es función de la concentración iónica

(cationes) presentes. Por lo que, el registro de este parámetro en una solución permite identificar de manera indirecta su salinidad. La conductividad eléctrica se registró por medio de un sensor incorporado en la sonda que utiliza ajuste por temperatura, los resultados se reportaron en unidades de  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  (microsiemens por centímetro).

#### 4.5.3.1.2 Temperatura

La medición de la temperatura es importante para realizar un diagnóstico más certero sobre la evolución hidrogeoquímica en las muestras de agua subterránea. Los resultados se reportaron en unidades de  $^{\circ}\text{C}$  (grados centígrados). Esta misma determinación se repitió en el laboratorio empleando un potenciómetro marca Thermo SCIENTIFIC™ (Figura 19).



Fig. 19. Potenciómetro marca Thermo SCIENTIFIC™ ORION™.

#### 4.5.3.2 Determinación de parámetros fisicoquímicos en laboratorio

En el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería Civil/UANL se realizaron las determinaciones analíticas correspondientes a cada muestra de agua subterránea, tomando en cuenta los equipos disponibles y metodologías establecidas (Tabla 4).

Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos cuantificados en las muestras de agua, métodos de determinación y Normas Oficiales Mexicanas vigentes

Parámetro	Método	Norma
pH y temperatura	Potenciométrico	NMX-008-SCFI-2011
Sólidos Totales (ST)	Gravimétrico	NMX-AA-034-SCFI-2015
Sólidos Totales Volátiles (STV)	Gravimétrico	NMX-AA-034-SCFI-2015
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	Gravimétrico	NMX-AA-034-SCFI-2015
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)	Gravimétrico	NMX-AA-034-SCFI-2015
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Espectrofotométrico	NMX-AA-030-SCFI-2001
Alcalinidad total (como CaCO <sub>3</sub> )	Volumétrico	NMX-AA-036-SCFI-2001
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	Volumétrico	NMX-AA-073-SCFI-2001
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Espectrofotométrico	NMX-AA-079-SCFI-2001
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	Espectrofotométrico	NMX-AA-074-SCFI-2014
Fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	Espectrofotométrico	NMX-AA-029-SCFI-2001
Nitrógeno Total (NT)	Espectrofotométrico	No aplica
BTEX	Cromatografía de gases (FID)	No aplica

La analítica de las muestras de agua subterránea se realizó siguiendo los métodos estandarizados descritos en “Métodos Normalizados para Análisis de Aguas Potables y Residuales” (1992). En la determinación de los parámetros se utilizó material volumétrico clase A, además de reactivos de alta pureza y material común de laboratorio.

A continuación, se detallan los parámetros determinados y los métodos analíticos empleados de acuerdo a las normas mexicanas vigentes.

#### 4.5.3.2.1 Potencial de Hidrógeno (pH) y temperatura

La medición del pH es fundamental para conocer parte de la calidad del agua. El pH indica la acidez o alcalinidad, en este caso de un líquido como el agua, pero es en realidad una medida de la actividad del potencial de iones de hidrógeno (H<sup>+</sup>) (Zamora, J., 2009).

Para la medición de pH y temperatura se tomó como base la NMX-008-SCFI-2011, se utilizó un potenciómetro marca Thermo SCIENTIFIC™. Previamente a la medición de las muestras se calibró el potenciómetro, posterior a la calibración se tomó una alícuota representativa (150 mL) de cada muestra de agua subterránea tomada en campo y se depositó en un vaso de precipitado. Para la obtención de resultados se hicieron 3 repeticiones de lectura para cada muestra, tomando como resultado final un promedio de las 3 lecturas tomadas. El rango de tolerancia es de 0,03. Si el resultado de las 3 lecturas continuas está fuera del rango, se verifica nuevamente.

#### 4.5.3.2.2 Sólidos Totales (ST)

Los ST representan el residuo que permanece en una cápsula después de evaporar y secar una muestra a una temperatura de  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Para realizar dicha determinación previamente se tararon y rotularon los crisoles correspondientes a cada muestra.

Preparación para la tara de crisoles:

1. Lavar correctamente con agua destilada.
2. Dejar secar en la estufa hasta eliminar toda la humedad presente en ellos.
3. Dejar reposar 20 minutos en el desecador.
4. Pesar en la balanza y registrar peso.
5. Repetir procedimiento horno – desecador hasta que se tengan 2 lecturas de pesos que no sobrepasen una variación de 0,0005 g de diferencia como máximo.

Para la medición de Sólidos Totales (ST) se tomó como base la NMX-AA-034-SCFI-2015. Con ayuda de una probeta graduada, se tomó un alícuota de 20 mL de agua homogeneizada de cada muestra de agua subterránea, cada alícuota fue depositada en su crisol correspondiente (ya rotulado y tarado). Después de introducir la muestra en el crisol se realizaron 3 lavados con agua destilada a las paredes de la probeta, esto para asegurarnos de no dejar ningún residuo, posterior al lavado, los crisoles fueron introducidos en el horno marca Thermo SCIENTIFIC™ (Figura 20) a  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 12 horas. Posteriormente a las 12 horas, tiempo en el cual se volatilizó la muestra introducida se procedió a colocar los crisoles en el desecador por un período de 20 minutos. Pasado los 20 minutos se pesó cada crisol en la balanza analítica marca OHAUS™ (Figura 21). Después de la primera medición, se introdujeron nuevamente al horno a  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 20 minutos, transcurrido el tiempo se colocaron en el desecador nuevamente por 20 minutos y finalmente se volvieron a pesar. Este ciclo de 20 minutos horno – desecador se repite las frecuencias que sean necesarias hasta tener dos lecturas con un margen de error de  $\leq 0.0005\text{ g}$  como máximo.

Terminado el análisis, la muestra residual, puede usarse para determinar el contenido de ST y/o de materia orgánica.

Cálculos:

$$ST \text{ (mg} \cdot \text{L}^{-1}\text{)} = \frac{(A - B)}{MI \text{ (Muestra, mL)}} * 1\,000\,000$$

A = Peso de la cápsula conteniendo la muestra después de la evaporación, (g).

B = Peso de la cápsula vacía, (g).



**Fig. 20.** Horno Thermo SCIENTIFIC™ Heratherm OGS180 General Lab Oven – Gravity.



**Fig. 21.** Balanza analítica 220G\* 0.0001G, modelo PIONEER, marca OHAUS.

#### 4.5.3.2.3 Sólidos Totales Volátiles (STV)

La determinación de los STV se basa en la pérdida de peso que sufre la muestra después de someterse a un proceso de calentamiento a  $550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Se tomó como base la NMX-AA-034-SCFI-2015.

Para la medición de Sólidos Totales Volátiles (STV), se tomó cada crisol con el residuo de ST y se introdujeron a la mufla marca Thermo SCIENTIFIC™ (Figura 22) a  $550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 15 min a 20 min. Transcurrido el tiempo se retiró cada crisol de la mufla y se trasladó al horno a  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 20 minutos. Transcurridos los 20 minutos se retiraron los crisoles del horno marca Thermo SCIENTIFIC™ y se depositaron en el desecador por un período de 20 minutos. Se realizó una primera lectura. Se repitió el

ciclo horno – desecador hasta obtener 2 lecturas con una diferencia de  $\leq 0,0005$  g como máximo.

Cálculos:

$$\text{STV (mg} \cdot \text{L}^{-1}\text{)} = \frac{(A - B)}{\text{MI (Muestra, mL)}} * 1\,000\,000$$

A = Peso de la cápsula conteniendo la muestra después de la evaporación, (g).

B = Peso de la cápsula conteniendo la muestra después de la calcinación, (g).



**Fig. 22.** Mufla LINDBERG BLUE M Thermo SCIENTIFIC™.

#### **4.5.3.2.4 Sólidos Suspendidos Totales (SST)**

Los SST corresponden al material constituido por los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos y coloidales que son retenidos por un filtro de fibra de vidrio con poro de  $1,5 \mu\text{m}$  secado y llevado a masa constante a una temperatura de  $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Para la medición de Sólidos Suspendidos Totales (SST) se tomó como base la NMX-AA-034-SCFI-2015. Previamente se tararon los crisoles Gooch correspondientes (Véase metodología de ST) a cada muestra de agua, dichos crisoles fueron tarados con el filtro de vidrio con poro de  $1,5 \mu\text{m}$  incluido (Figura 23). El filtro fue adherido al crisol con agua

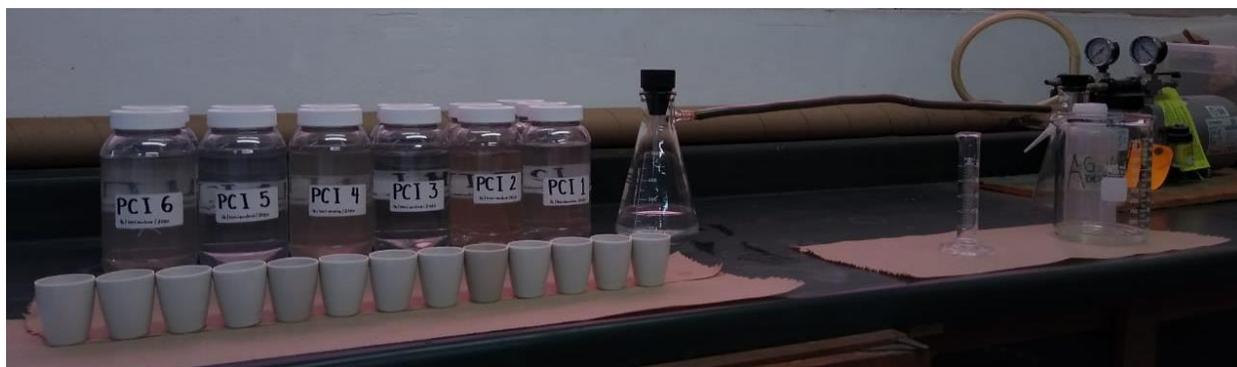
destilada aplicándole vacío. Teniendo cada crisol preparado (rotulado y tarado con filtro) se procedió a realizar el análisis. Con ayuda de una probeta graduada se añadió una alícuota de 3 mL de agua homogeneizada de cada muestra de agua subterránea (esto para una mayor captación de sólidos suspendidos) a su respectivo crisol, posteriormente se le aplicó nuevamente vacío. Después de aplicar vacío al crisol con la muestra de agua, se realizaron 3 lavados con agua destilada a las paredes de la probeta, esto para asegurarnos de no dejar residuo de las muestras. Teniendo los crisoles con sus respectivas muestras se procedió a introducirlos al horno marca Thermo SCIENTIFIC™ a  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . durante 1 hora, tiempo en que la muestra se evaporó. Posteriormente a 1 hora, se retiraron los crisoles del horno y se colocaron en el desecador por un período de 20 minutos. Pasado los 20 minutos se pesó cada crisol en la balanza analítica marca OHAUS™. Después de la primera medición, se introdujeron nuevamente al horno a  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 20 minutos, transcurrido el tiempo se colocaron en el desecador nuevamente por 20 minutos y finalmente se volvieron a pesar. Este ciclo de 20 minutos horno – desecador se repite las frecuencias que sean necesarias hasta tener dos lecturas con un margen de error de  $\leq 0.0005\text{ g}$  como máximo.

Cálculos:

$$\text{SST (mg} \cdot \text{L}^{-1}\text{)} = \frac{(A - B)}{\text{MI (Muestra, mL)}} * 1\,000\,000$$

A = Peso de la cápsula con el filtro y la muestra filtrada después de la evaporación, (g).

B = Peso de la cápsula de porcelana antes de la filtración, (g).



**Fig. 23.** Procedimiento para la identificación de SST.

#### 4.5.3.2.5 Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)

Los SSV son aquellos sólidos suspendidos que se volatilizan en la calcinación a  $550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Los SSV son la cantidad de materia orgánica (incluidos aquellos inorgánicos) capaz de volatilizarse por el efecto de la calcinación. Se tomó como base la NMX-AA-034-SCFI-2015.

Para la medición de Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV), se tomó el crisol con el residuo de SST y se introdujo a la mufla marca Thermo SCIENTIFIC™ a  $550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 15 min a 20 min. Transcurrido el tiempo se retiró el crisol de la mufla y se trasladó al horno marca Thermo SCIENTIFIC™ a  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 20 minutos. Pasado los 20 minutos se retiró el crisol del horno y se depositó en el desecador por 20 minutos. Se realizó una primera lectura. Se repitió el ciclo horno – desecador hasta obtener 2 lecturas con una diferencia de  $\leq 0,0005\text{ g}$  como máximo.

Cálculos:

$$\text{SSV (mg} \cdot \text{L}^{-1}\text{)} = \frac{(A - B)}{\text{MI (Muestra, mL)}} * 1\,000\,000$$

A = Peso de la cápsula con el filtro y la muestra filtrada después de la evaporación, (g).

B = Peso de la cápsula conteniendo la muestra después de la calcinación, (g).

#### 4.5.3.2.6 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Se entiende por demanda química de oxígeno (DQO), la cantidad de materia orgánica e inorgánica en un cuerpo de agua susceptible de ser oxidada por un oxidante fuerte.

Para la determinación de DQO se tomó como base la NMX-AA-030-SCFI-2001. Para realizar dicha determinación se requirió de un digestor modelo DRB 200® (Figura 24) el cual previamente se programó a  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  y tubos para digestión de 16 mm x 100 mm con tapa.

- Curva de calibración.

Para la elaboración de la curva de calibración se realizaron los cálculos necesarios para establecer los intervalos correspondientes, esto con la finalidad de conocer los distintos volúmenes de cada dilución. Se preparó la disolución estándar de biftalato de potasio ( $\text{C}_8\text{H}_5\text{KO}_4$ ) a una concentración de  $1000\text{ mg L}^{-1}$  utilizando matraces volumétricos de 1 L.

Primeramente, se prepararon las disoluciones de biftalato de potasio con DQO equivalentes de 20 mg O<sub>2</sub>/L a 900 mg O<sub>2</sub>/L, se tomó el volumen deseado para cada concentración y se colocaron en matraces volumétricos de 25 mL llevándose al aforo con agua destilada. Posteriormente, de cada matraz volumétrico se tomó un alícuota de 2.5 mL y se depositó en cada uno de los tubos para digestión. A su vez, en la campana de gases, se añadió a cada uno de los tubos un volumen de 1.5 mL de la disolución digestora B (para bajas concentraciones) y 3.5 mL de la disolución de sulfato de plata en ácido sulfúrico (Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Una vez adicionado la disolución de Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> se tapó inmediatamente cada tubo para evitar la volatilización de los compuestos orgánicos y el escape de gases. Cada tubo fue colocado en el vórtex por un tiempo de 10 segundos, transcurrido dicho tiempo fueron colocados en el digestor por un período de 2 horas a 150 °C. Pasado el tiempo, se dejaron enfriar las muestras a temperatura ambiente, habiendo alcanzado una temperatura ambiente se procedió a la lectura de cada tubo en el espectrofotómetro UV-vis marca PerkinElmer® (Figura 25).

- Análisis de muestra.

De cada muestra de agua subterránea se tomó una alícuota de 2.5 mL y se colocaron en los tubos para digestión. En la campana de gases, se añadió a cada uno de los tubos un volumen de 1.5 mL de la disolución digestora B y 3.5 mL de la disolución de sulfato de plata en ácido sulfúrico (Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Una vez adicionado la disolución de Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> se tapó inmediatamente cada tubo para evitar la volatilización de los compuestos orgánicos y el escape de gases (Figura 26). Cada tubo fue colocado en el vórtex por un tiempo de 10 segundos, posterior a dicho tiempo fueron colocados en el digestor por un período de 2 horas a 150 °C. Transcurrido el tiempo, se dejaron enfriar las muestras a temperatura ambiente, habiendo alcanzado una temperatura ambiente se procedió a la lectura de cada tubo en el espectrofotómetro UV-vis marca PerkinElmer®.

Cálculos:

$$y = mX + b$$

m = pendiente

b = ordenada al origen

y = absorbancia

X = concentración (mg DQO/L)



Fig. 24. Digestor modelo DRB 200® Marca Hach®.



Fig. 25. Espectrofotómetro UV-visible LAMBDA™ 365, Marca PerkiElmer®.



Fig. 26. Muestras de agua subterránea posterior a la adicción de la disolución digestora y la disolución de  $\text{Ag}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{SO}_4$ .

#### 4.5.3.2.7 Iones (aniones)

##### 4.5.3.2.7.1 Alcalinidad Total (Ak) como $\text{CaCO}_3$

Para la determinación de dureza total como  $\text{CaCO}_3$  se tomó como base la NMX-AA-036-SCFI-2001. Requirió del siguiente material: agitadores, vasos de precipitados, bureta graduada, soporte universal, parrilla agitadora, solución de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (0,1 N) y naranja de

metilo. Primeramente, se preparó la zona para analizar, se rellenó la bureta graduada con solución 0,1 N de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y se colocó en el soporte universal en dirección al vaso de precipitado. De cada muestra de agua subterránea se tomó una alícuota de 50 mL, dichos volúmenes se depositaron en vasos de precipitados en los cual se le añadió a cada uno un total de 3 gotas de naranja de metilo y un agitador, dichos vasos de precipitados fueron puestos en agitación colocándose sobre la parrilla agitadora. Lentamente se le añadió la solución de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a la muestra (Figura 27), al observar una reacción del  $\text{H}_2\text{SO}_4$  con los carbonatos de la muestra se produjo un cambio de coloración que fue de amarillento a rojizo (Figura 28). Con el resultado del volumen añadido se pudieron realizar los cálculos correspondientes.

Cálculos:

$$Ak \text{ (mg} \cdot \text{L}^{-1}\text{)} = \frac{V * N * 50 * 1\ 000}{V \text{ muestra, mL}}$$

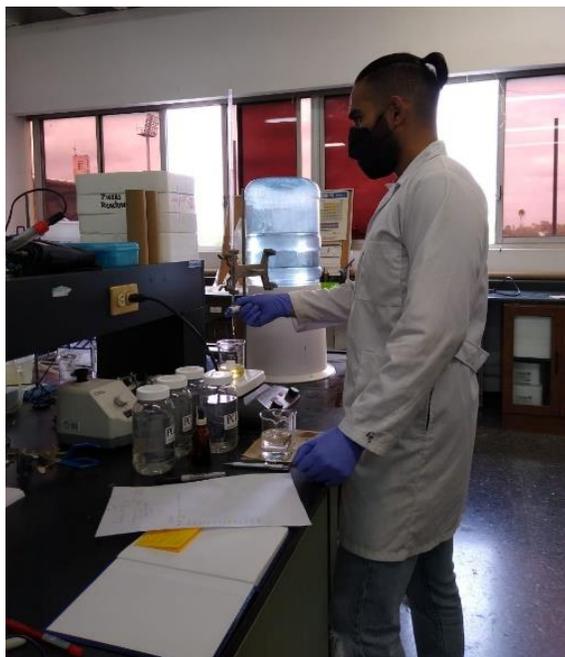
Ak = Alcalinidad de la muestra en  $\text{mg/L}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$ .

V = Volumen de titulante gastado, (mL).

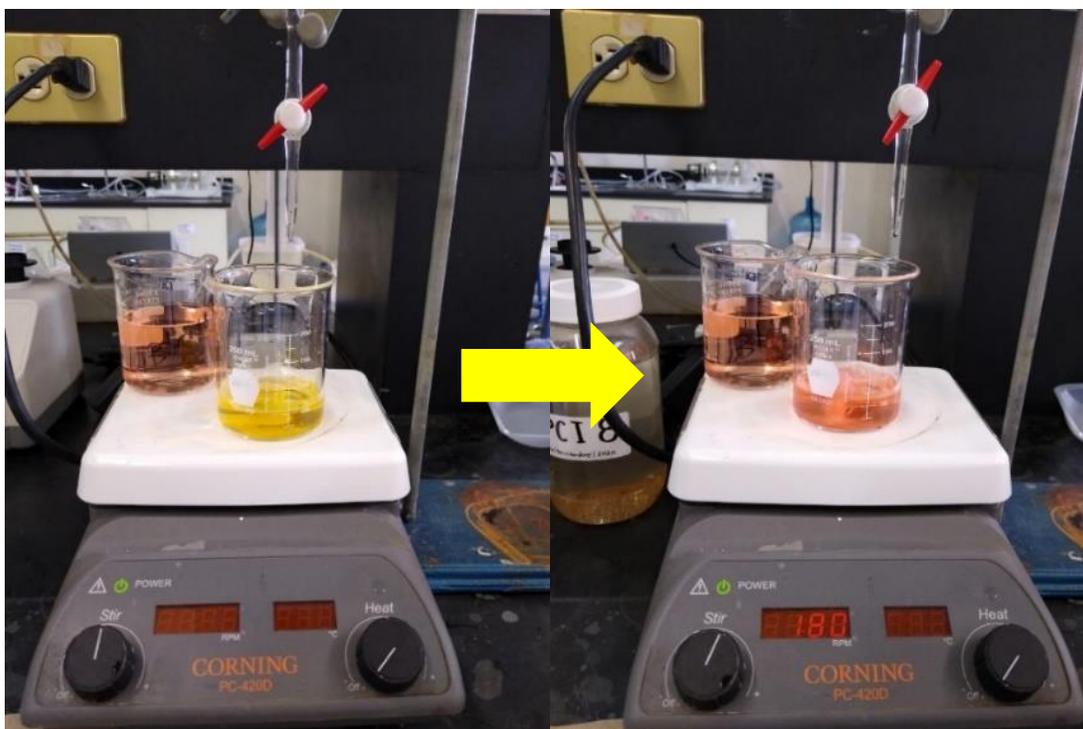
N = Normalidad del agente titulante, ( $\text{Eq L}^{-1}$ ).

50 = Es el factor para convertir  $\text{Eq L}^{-1}$  a  $\text{mg CaCO}_3 \text{L}^{-1}$ .

1 000 = Factor para convertir de mL a L.



**Fig. 27.** Adición de la solución de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (0,1 N) a la muestra de agua subterránea para su reacción.



**Fig. 28.** Cambio de coloración amarillento a rojizo al reaccionar el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  con la muestra.

#### 4.5.3.2.7.2 Cloruros ( $\text{Cl}^-$ )

Para la determinación de cloruros se tomó como base la NMX-AA-073-SCFI-2001. Requirió del siguiente material: agitadores, vasos de precipitados, bureta graduada, soporte universal, parrilla agitadora, disolución de nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ) (0,014 N) y disolución indicadora de cromato de potasio ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ). Primeramente, se preparó la zona para analizar, se rellenó la bureta graduada con solución 0,014 N de  $\text{AgNO}_3$  y se colocó en el soporte universal en dirección al vaso de precipitado. De cada muestra de agua subterránea se tomó una alícuota representativa (dependerá de la concentración de la muestra) dichos volúmenes se depositaron en vasos de precipitados y fueron llevados a un aforo de 100 mL con agua destilada, posterior al aforo se le agregó a cada muestra una alícuota de 1 mL de cromato de potasio, dichos vasos de precipitados fueron puestos en agitación colocándose sobre la parrilla agitadora. Lentamente se le añadió la solución de  $\text{AgNO}_3$  a la muestra, al observar una reacción del  $\text{AgNO}_3$  con los cloruros de la muestra se produjo un cambio de coloración que fue de amarillo a naranja rojizo (Figura

29). Con el resultado del volumen añadido se pudieron realizar los cálculos correspondientes.

Cálculos:

$$\text{Cl}^- \text{ mg/L} = [(A - B) \times N \times 35,450] / \text{mL de muestra}$$

A = mL de disolución de nitrato de plata gastados en la valoración de la muestra

B = mL de disolución de nitrato de plata gastados en la valoración del blanco

N = normalidad del nitrato de plata

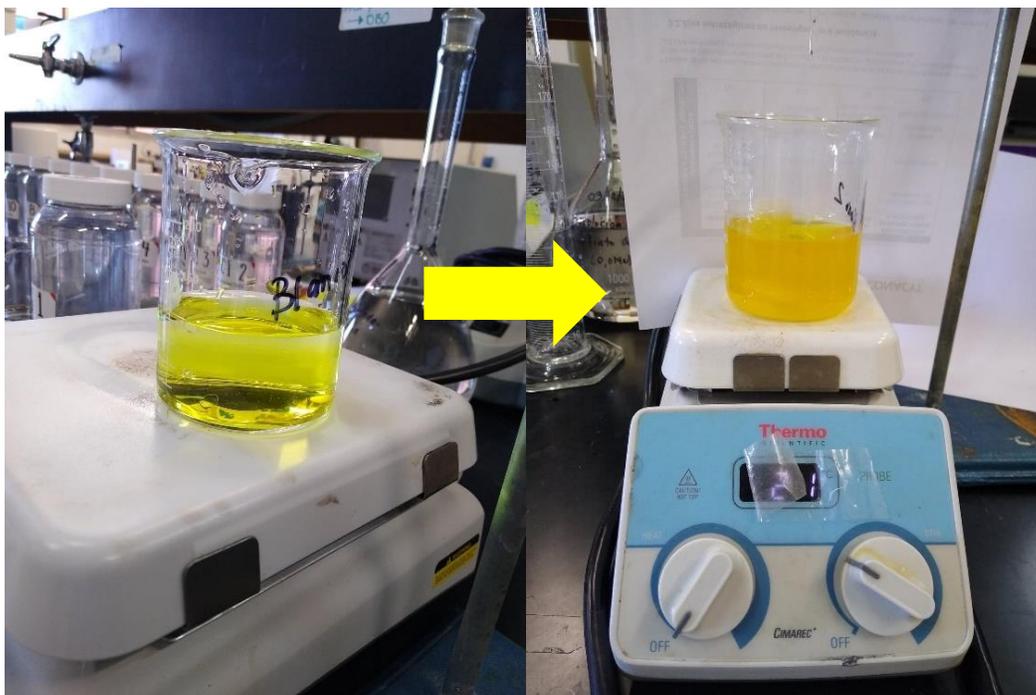


Fig. 29. Cambio de coloración de amarillo a amarillo rojizo al reaccionar el  $\text{AgNO}_3$  con la muestra.

#### 4.5.3.2.7.3 Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ )

El nitrato es una de las formas de nitrógeno de mayor interés en las aguas naturales, residuales y residuales tratadas, se presenta generalmente a nivel de trazas en el agua de superficie, pero puede alcanzar niveles elevados en las subterráneas.

Una concentración alta de nitratos es indicio de una etapa mayor de mineralización de los compuestos nitrogenados. En las aguas de algunos pozos suele encontrarse cantidades apreciables de nitratos, lo que es objetable desde el punto de vista sanitario. Para la determinación de nitratos se tomó como base la NMX-AA-079-SCFI-2001.

- Curva de calibración.

Primeramente, se preparó el material: tubos suficientemente grandes para almacenar 22.5 mL, tapones ya sea de caucho o Parafilm, plancha, gradilla, hielo y 2 recipientes profundos para poner la gradilla.

Para la elaboración de la curva de calibración se tomaron las siguientes alícuotas (mL) de la disolución intermedia de  $\text{N-NO}_3^-$ : 1, 2, 4, 7 y 10, se aforó a 10 mL con agua destilada (dicha alícuota aforada fue depositada en los tubos previamente rotulados).

Todos los tubos se colocaron en una gradilla y se introdujeron en un recipiente con agua fría (el recipiente debe ser lo suficiente profundo como para cubrir  $\frac{3}{4}$  de la altura los tubos).

Se añadieron 2 mL de cloruro de sodio a cada tubo, se taparon y mezclaron manualmente por 1 minuto.

Se añadieron 10 mL de ácido sulfúrico a cada tubo, se taparon y mezclaron manualmente por 1 minuto (se recomienda mantener los tubos siempre en la gradilla de baño frío, solamente sacar el tubo para la adicción, tapar, mezclar y volver a meter al baño de agua fría).

Se añadieron 0.5 mL del reactivo de brucina – ácido sulfanílico, se mezclaron manualmente y colocaron en la gradilla.

La gradilla se retiró del baño de agua fría y se depositó en un recipiente en ebullición (el agua se encontraba previamente calentándose en la plancha), el recipiente debe ser lo suficiente profundo como para cubrir  $\frac{3}{4}$  de la altura los tubos.

Se dejó la gradilla dentro del baño de agua en ebullición durante un período de 20 minutos (se mantuvo una temperatura constante).

Transcurrido el período de 20 minutos se retiró la gradilla y se colocó nuevamente en el baño de agua fría.

Al alcanzar temperatura ambiente se procedió a leer cada muestra en el espectrofotómetro UV-vis marca PerkinElmer®

- Análisis de muestra.

Se tomó una alícuota de 10 mL de cada muestra de agua subterránea (o su respectiva dilución), dicha alícuota fue depositada en los tubos previamente rotulados.

Todos los tubos se colocaron en una gradilla y se introdujeron en un recipiente con agua fría (el recipiente debe ser lo suficiente profundo como para cubrir  $\frac{3}{4}$  de la altura los tubos).

Se añadieron 2 mL de cloruro de sodio a cada tubo, se taparon y mezclaron manualmente por 1 minuto.

Se añadieron 10 mL de ácido sulfúrico a cada tubo, se taparon y mezclaron manualmente por 1 minuto, se recomienda mantener los tubos siempre en la gradilla de baño frío, solamente sacar el tubo para la adicción, tapar, mezclar y volver a meter al baño de agua fría.

Se añadieron 0.5 mL del reactivo de brucina – ácido sulfanílico, se mezclaron manualmente y colocaron en la gradilla.

La gradilla se retiró del baño de agua fría y se depositó en un recipiente en ebullición (el agua se encontraba previamente calentándose en la plancha), el recipiente debe ser lo suficiente profundo como para cubrir  $\frac{3}{4}$  de la altura los tubos.

Se dejó la gradilla dentro del baño de agua en ebullición durante un período de 20 minutos, se mantuvo una temperatura constante (Figura 30).

Transcurrido el período de 20 minutos se retiró la gradilla y se colocó nuevamente en el baño de agua fría.

Al alcanzar temperatura ambiente se procedió a leer cada muestra en el espectrofotómetro UV-vis marca PerkinElmer®

Cálculos:

$$y = mX + b$$

m = pendiente

b = ordenada al origen

y = absorbancia

X = concentración (mg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L)



**Fig. 30.** Análisis de nitratos en muestras de agua subterránea.

#### 4.5.3.2.7.4 Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

Los sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) están ampliamente distribuidos en la naturaleza y pueden estar presentes en aguas naturales, en concentraciones que varían desde pocos hasta miles de miligramos por litro. Para la determinación de sulfatos se tomó como base la NMX-A-074-SCFI-2014.

- Curva de calibración.

Primeramente, se prepararon las concentraciones para la curva de calibración, se tomaron las siguientes alícuotas (mL) de la disolución de  $\text{SO}_4^{2-}$ : 5, 10, 20, 30 y 40, posteriormente en un matraz volumétrico se aforaron a 100 mL con agua destilada.

Cada disolución aforada a 100 mL fue traspasada a vasos de precipitados previamente rotulados (se recomienda pasar a un vaso precipitado ya que se aplicará agitación mediante agitadores magnéticos), a cada vaso de precipitado se le añadió un volumen de 20 mL de la disolución "BUFFER A".

Ya incorporada la disolución “BUFFER A” se introdujo un agitador magnético a cada vaso de precipitado y se colocaron en la parrilla para iniciar con la agitación, se agregó una cucharilla de cloruro de bario a cada disolución, a partir del momento en que se añadió la cucharilla se agitó por exactamente 1 minuto más.

Transcurrido el plazo de un minuto en agitación se dejaron reposar las disoluciones por un período de 5 minutos.

Posteriormente, se pudieron leer en el espectrofotómetro UV-vis marca PerkinElmer® (Figura 31).

- Análisis de muestras.

Se tomó una alícuota de 5 mL de cada muestra de agua subterránea y se aforó en un matraz volumétrico a 100 mL con agua destilada.

Cada muestra aforada fue traspasada a vasos de precipitados previamente rotulados (se recomienda pasar a un vaso de precipitado ya que se aplicará agitación mediante agitadores magnéticos) y se le añadió un volumen de 20 mL de disolución “BUFFER A” a cada muestra.

Ya incorporada la disolución “BUFFER A” se introdujo un agitador magnético a cada vaso de precipitado y se colocaron en la parrilla para iniciar con la agitación, se agregó una cucharilla de cloruro de bario a cada muestra, a partir del momento en que se añadió la cucharilla se agitó por exactamente 1 minuto más.

Transcurrido el plazo de un minuto en agitación se dejaron reposar las muestras por un período de 5 minutos (si no creó color para la lectura agregar mayor cantidad de muestra).

Posteriormente, se pudieron leer en el espectrofotómetro UV-vis marca PerkinElmer®.

Cálculos:

$$y(\text{SO}_4^{2-}) = [\alpha(\lambda) - a] / b$$

b = pendiente

a = ordenada al origen

$\alpha(\lambda)$  = absorbancia del ion sulfato a la longitud de onda  $\lambda$

$y(\text{SO}_4^{2-})$  = concentración de masa del ion sulfato expresada en mg/L de  $\text{SO}_4^{2-}$ .



**Fig. 31.** Soluciones con diferente concentración para elaborar la curva de calibración de sulfatos.

#### 4.5.3.2.7.5 Fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ )

Para la determinación de fosfatos se tomó como base la NMX-AA-029-SCFI-2001, utilizando el método ácido vanadomolibdofosfórico.

- Curva de calibración.

Primeramente, se prepararon las concentraciones para la curva de calibración, se tomaron las siguientes alícuotas (mL) de la disolución estándar: 1, 2, 3, 4 y 5, posteriormente en un matraz volumétrico se aforaron a 50 mL con agua destilada.

Se dejó reposar la disolución por un periodo de 10 minutos, habiendo transcurrido el tiempo se pudieron leer en el espectrofotómetro UV-vis marca PerkinElmer®.

- Análisis de muestras.

Se tomó una alícuota representativa de 20 o 30 mL (según la concentración) de cada muestra de agua subterránea, a cada muestra se le agregó un volumen de 10 mL de la disolución vanado-molibdato y se aforó en un matraz volumétrico a 50 mL con agua destilada (Figura 32).

Se dejó reposar la disolución por un periodo de 10 minutos, habiendo transcurrido el tiempo se pudieron leer en el espectrofotómetro UV-vis marca PerkinElmer®.

Cálculos:  $y = mX + b$

m = pendiente

b = ordenada al origen

y = absorbancia

X = concentración (mg P/L<sup>-1</sup>)



**Fig. 32.** Reposo de muestras de agua subterránea con 10 mL de disolución vanado-molibdato aforadas a 50 mL con agua destilada.

#### 4.5.3.2.7.6 Nitrógeno Total (NT)

La determinación de Nitrógeno Total (NT) se realizó con base al método HACH 10072 por medio de una digestión con persulfato, dicho método consistió de 2 partes:

1. Reactivos de Hidróxido.
2. Reactivo ácido.

Para llevar a cabo la determinación se preparó el digestor modelo DRB 200<sup>®</sup> en 105° C, del kit de hidróxido se tomó la cantidad de tubos correspondientes a las muestras, así como un sobre con reactivo de persulfato para cada tubo. Cada tubo fue rotulado para su identificación. Se agregó el sobre de persulfato a cada tubo y se introdujo .5 mL de muestra de agua subterránea a cada tubo previamente rotulado. Se agitó manualmente (no vórtex) por 30 segundos. Después de dicha agitación manual se procedió a llevar las muestras al digestor por un período de 30 minutos. Transcurrido el tiempo de la digestión se retiraron los tubos y se pusieron a enfriar. Teniendo las muestras atemperadas, se agregó de la parte del reactivo ácido los reactivos “A” y “B” para completar la reacción de

las muestras, posterior a introducir ambos reactivos a cada tubo se dejaron reaccionar por un lapso de 2 minutos. Del reactivo ácido se tomaron los tubos correspondientes al número de muestras y se introdujeron 2 mL de muestra de los tubos de la parte del reactivo de hidróxido (Figura 33), se rotularon los tubos de la parte ácida, se mezclaron manualmente y se dejaron reaccionar durante 5 minutos en ventilación. Posteriormente, se pudo realizar la lectura en el espectrofotómetro UV-vis marca PerkinElmer® (Figura 34).

Cálculos:

$$y = mX + b$$

m = pendiente

b = ordenada al origen

y = absorbancia

X = concentración (mg N/L<sup>-1</sup>)



**Fig. 33.** Toma de una alícuota de 2 mL del reactivo de hidróxido para ser depositado en los tubos del reactivo ácido.



**Fig. 34.** Muestras de Nitrógeno Total colocadas para su digestión en el Digestor modelo DRB 200® Marca Hach®.

#### 4.5.3.2.8 Iones (cationes)

Las muestras de 125 mL acidificadas fueron enviadas al Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la Facultad de Ingeniería/UASLP, para el análisis de elementos químicos mayores como el  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ . Para la determinación de los iones mayores (cationes) fue necesaria la intervención de la técnica de análisis de espectroscopía de plasma óptico (ICP-OES) marca Thermo SCIENTIFIC™ (Figura 35); en dicha técnica, los átomos en su estado fundamental son excitados a estados energéticos superiores denominados estados excitados. Dichos átomos o iones excitados son inestables y tienden a volver a su estado fundamental, devolviendo la energía absorbida en forma de radiaciones electromagnéticas de longitudes de onda características. Las frecuencias de las radiaciones emitidas están relacionadas directamente con la configuración electrónica y con la energía que proporciona la fuente de excitación. Cada elemento, por tanto, produce un conjunto de radiaciones a longitudes de onda fijas (líneas) que constituyen su espectro atómico característico. La intensidad de la radiación, que es proporcional a la concentración del elemento en la muestra, se recalcula internamente mediante un sistema almacenado de curvas de calibración, obteniendo así la concentración para cada elemento. La información resultado de la aplicación de esta técnica es procesada por el sistema informático.



**Fig. 35.** Espectrómetro de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), marca Thermo SCIENTIFIC™, modelo iCAP 7400 Duo.

#### 4.5.3.2.9 Determinación de COV BTEX

La determinación de BTEX fue realizada utilizando cromatografía de gases de alta resolución con detector de ionización de llama (CG-FID). Se utilizó un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo GC 7820<sup>a</sup> (Figura 36).

Se tomó un alícuota representativa (40 mL) de cada muestra de agua subterránea y fue depositada en el saturador (previamente lavado con agua destilada), con ayuda de un soporte metálico se sujetó el saturador y fue colocado en un recipiente con agua y hielo el cual se mantuvo a una temperatura constante de 20° C (el agua cubrió  $\frac{3}{4}$  partes del saturador), cabe mencionar que dicho sistema se ubicó a un extremo del cromatógrafo de gases. Estando la muestra en el saturador posicionada a un extremo del cromatógrafo y a una temperatura constante de 20° C se colocó en línea directa con el flujo de nitrógeno grado cero (previamente calibrado a 36 mL/min<sup>-1</sup>), enseguida se realizó la prueba de hermeticidad del sistema, al comprobar que no existieron fugas en las conexiones se procedió a la apertura de la válvula del gas carrier (nitrógeno).

Los compuestos volátiles BTEX concentrados a 20° C fueron transportados hasta el sistema de inyección del CG-FID. La muestra fue inyectada al CG-FID por medio de la válvula neumática de 6 vías (Figura 37) a temperatura de 200° C, mediante un sistema neumático la válvula gira y la muestra entra en contacto con el gas de barrido (gas argón grado cero INFRA, 99.9999%), inmediatamente, la muestra fue transportada a la columna capilar de sílice marca Supelco (Figura 38) instalada dentro del horno a 100°C (análisis isotérmico), sitio donde se llevó a cabo la separación de las moléculas de interés y posteriormente fueron analizadas en el detector FID a 250°C. Las señales eléctricas son transformadas y posteriormente integradas por medio del software EZChrom Elite 3.2.0. En la Figura 39 se encuentra representado gráficamente el método experimental utilizado. Este sistema se empleó para cada una de las muestras de agua subterránea.

Las áreas obtenidas en los cromatogramas se relacionan con las pendientes de las curvas de calibración y de esta manera se calculan las concentraciones de BTEX correspondientes. Para esto se realizó un análisis basado en las áreas de los picos, como se sabe, el área del pico es función de la cantidad de componentes o de la concentración del mismo.

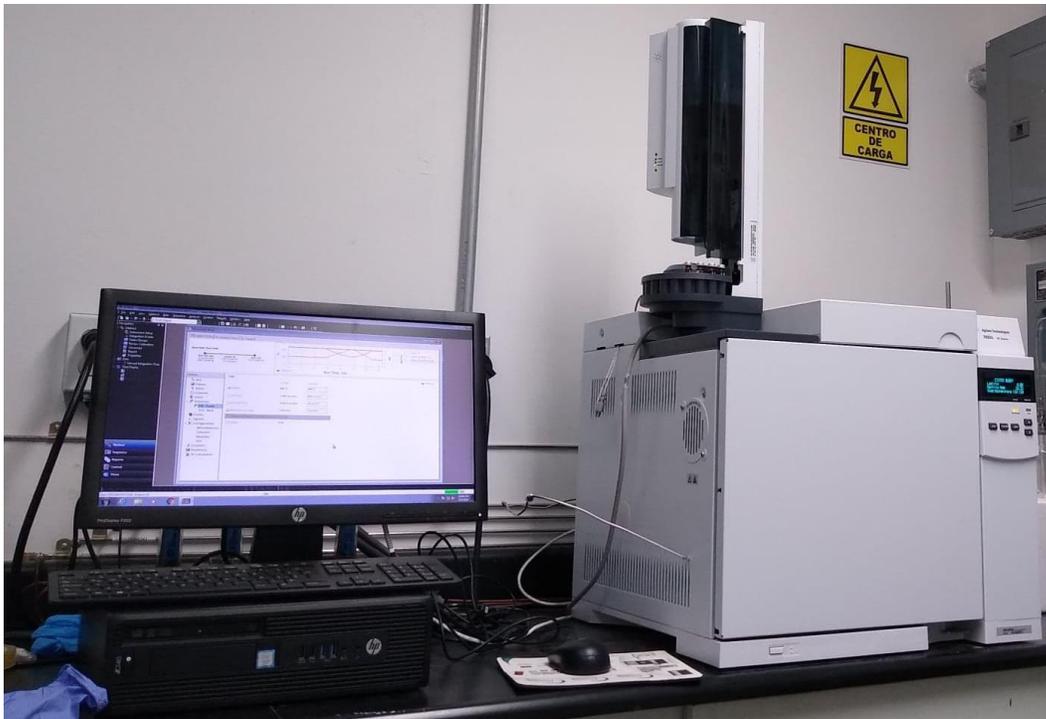


Fig. 36. Cromatógrafo de gases marca Agilent modelo GC 7820<sup>®</sup>.

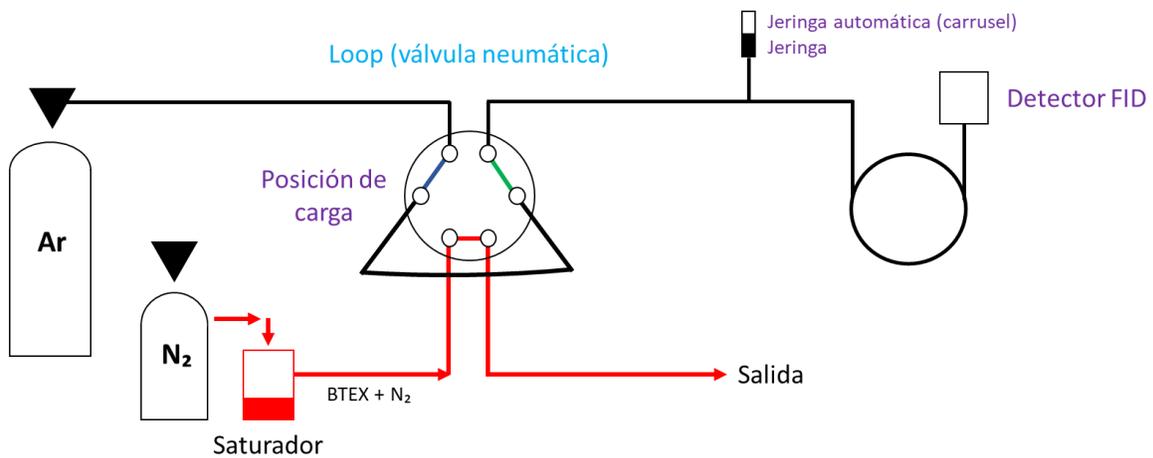
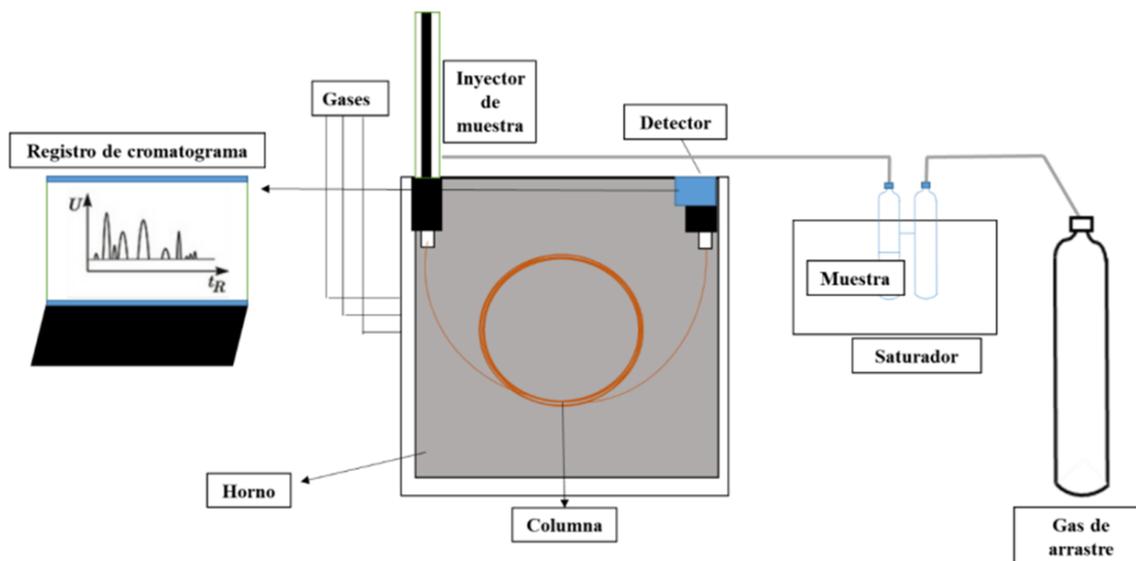


Fig. 37. Formas de inyección de analitos al cromatógrafo de gases. (Elaboración propia).



**Fig. 38.** Columna capilar de sílice marca Supelco, No. 65233-03A (L × I.D. 30 m × 0.25 mm, df 0.25  $\mu$ m).



**Fig. 39.** Método experimental gráfico.  
Tomada de: De la Fuente (2021).

#### 4.5.3.2.9.1 Condiciones del cromatógrafo

Para la detección de los compuestos orgánicos volátiles BTEX, fue necesario la implementación y acondicionamiento del cromatógrafo de gases, en la Tabla 5, se presentan las condiciones específicas con las cual operó el cromatógrafo para la determinación de dichos compuestos.

Tabla 5. Condiciones cromatográficas para la detección de COV BTEX.

Función	Unidades
Valves Heater	200 °C
Inlets Heater	250 °C
Pressure	12 psi
Columns Pressure	12 psi
Oven Temperature	100 °C
Equilibration Time	1 min
Air Flow	400 mL/min
H <sup>2</sup> Fuel Flow	30 mL/min
Makeup Flow	5 mL/ min
Flame	7.4

#### 4.5.3.2.9.2 Estándares químicos y cuantificación

Para la realización de las curvas de calibración para COV BTEX se utilizaron estándares químicos marca Sigma Aldrich (Figura 40), con base a las concentraciones de dichos estándares fue posible la cuantificación de la concentración en muestras acuosas. Los estándares BTEX fueron sometidos a la misma metodología que las muestras de agua subterránea, esto para obtener los resultados correspondientes según diferentes concentraciones. Con los resultados obtenidos en los cromatogramas fue posible determinar los tiempos de retención de cada compuesto, así como su curva cromatográfica.



Fig. 40. Estándar Analítico en DMSO, 1 mg.mL<sup>-1</sup> (Sigma Aldrich, Catálogo No.: 43728-10X1ML).

En la Tabla 6 se pueden observar los tiempos de retención para los diferentes COV BTEX obtenidos a partir de los estándares utilizados.

Tabla 6. Tiempos de retención de los COV BTEX empleando una columna capilar de sílice.

Compuesto	Tiempo de retención (min)	Punto de ebullición (°C)
Benceno	3.5	80
Tolueno	4.2	110
Etilbenceno	5	136
Xileno	5.2	138

Para las curvas de calibración de benceno y tolueno (Figura 41 y 42), se tomaron 3 soluciones con las siguientes concentraciones: 1 ppm, 4 ppm y 10 ppm. Cabe mencionar que cada disolución fue aforada en diferente matraz volumétrico con agua destilada.

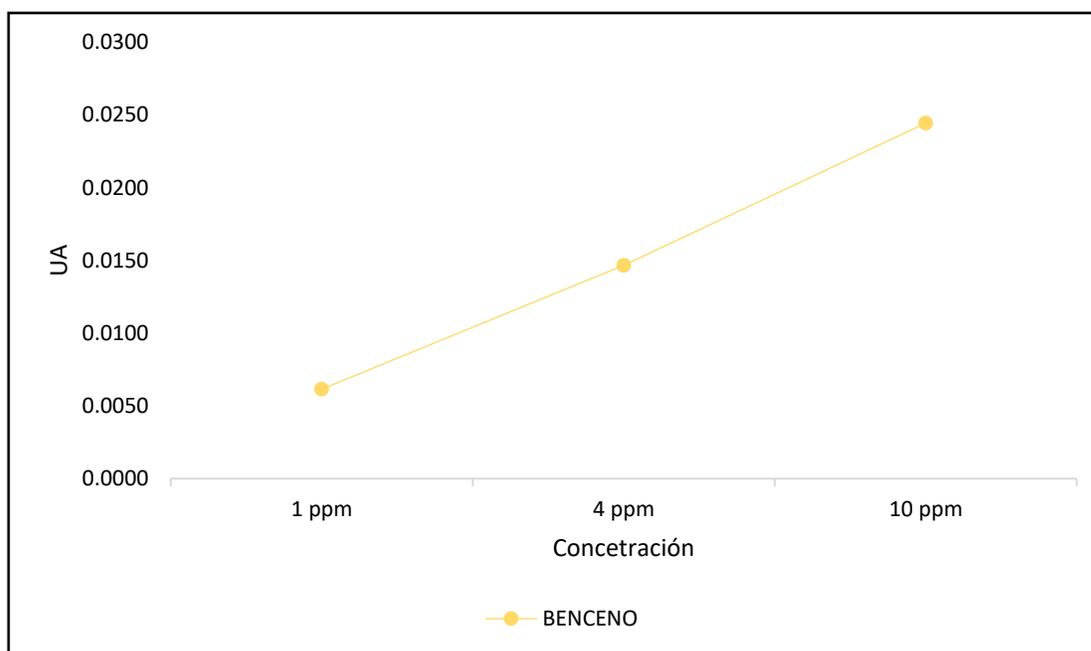
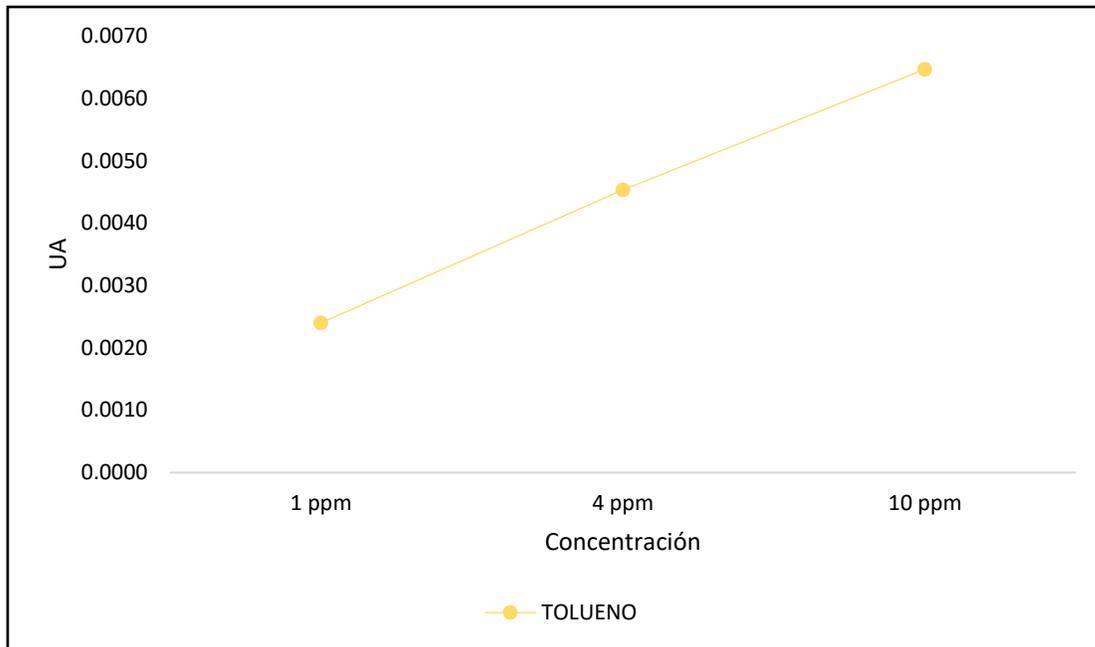


Fig. 41. Curva de calibración para benceno.



**Fig. 42.** Curva de calibración para tolueno.

# **CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIONES**

## Capítulo 5: RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 5.1 Geología

La relación que existe entre el medio geológico y la calidad de agua subterránea adquiere una mayor importancia cuando la estructura geológica presente favorece la entrada de contaminantes hacia el acuífero, por lo tanto, es necesario conocer el comportamiento geológico/estructural y su conexión con las condiciones hidrogeológicas existentes en el área, que permitan analizar de manera preliminar la vulnerabilidad que el acuífero presenta a la contaminación.

La morfología del área de estudio se caracteriza por una serie de lomeríos y promontorios bajos con orientaciones norte-sur compuestas de rocas sedimentarias, conglomerados y sedimentos aluviales (terrazas), separados por el valle del río Camacho, tributario del río Pabillo y colector de la presa Cerro Prieto.

El área de estudio se localiza en la Planicie Costera del Golfo Norte, perteneciente a la Sierra Madre Oriental, la cual se vio influenciada por los eventos compresivos que la deformaron. Las estructuras existentes en el área de estudio presentan una orientación general al NW-SE, que concuerda con el tren estructural de la SMO. El intenso fracturamiento que predomina en las rocas es debido a dichos esfuerzos compresivos. La geología del área, la conforman rocas de la Formación Méndez de edad cretácica, así como conglomerados Terciarios y sedimentos aluviales del Cuaternario, de los cuales están compuestas las terrazas que encontramos aflorando sobre el lecho del río Camacho. Rocas consolidadas pertenecientes a la Formación Méndez son compuestas principalmente por lutitas y areniscas calcáreas de baja permeabilidad, que al estar fuertemente fracturadas generan el medio ideal para la infiltración de los escurrimientos superficiales y contaminantes hacia el agua subterránea. Los conglomerados, así como los sedimentos aluviales componen el acuífero de poros, cuyo espesor somero y sus propiedades de permeabilidad facilitan la infiltración y el transporte de contaminantes.

Las rocas más antiguas que afloran en el área de estudio pertenecen a la Formación Méndez. Son de edad Cretácica y están compuestas por rocas lutíticas intercaladas con areniscas calcáreas. Sobre esta Formación se depositan espesores de conglomerados

en diferentes niveles o terrazas de edad Terciaria y Cuaternaria, producto del transporte de antiguos cauces de ríos y arroyos. Estos conglomerados se fueron depositando en forma horizontal en los valles y con ligeras inclinaciones sobre los lomeríos. Gran parte del área está cubierta en la superficie por depósitos aluviales compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas, producto de la erosión de rocas consolidadas durante el Cuaternario.

### Formación Méndez

En casi toda la base del área afloran lutitas homogéneas grises a olivo, con intemperismo marrón-café de la Formación Méndez, con un fracturamiento característico en forma de “lápiz” en la parte superficial (Figura 43). Su estilo de fracturamiento es del tipo concoidal y se encuentra muy intemperizada, mostrando una estructura de laminillas, que cambian de una coloración gris en la roca sana a café amarillento.

El espesor según el pozo Linares-1 de PEMEX (1977) es de 1 458 m, localizado en el ejido de Lucio Blanco/Tamps (PAICYT 2003). Hidrogeológicamente no constituyen acuíferos potenciales debido al contenido arcilloso, pero adquieren una permeabilidad secundaria de acuerdo al grado alto de fracturamiento que presentan.



**Fig. 43.** Fracturamiento tipo “lápiz” en lutita Méndez altamente intemperizada.

En el Cerrito se observan las lutitas altamente intemperizadas (Figura 44), con una coloración que varía de gris a amarillento en forma de material suelto o suelo arcilloso semiconsolidado. En afloramientos medidos presentan un intenso fracturamiento, con extensión entre fracturas desde mm hasta 2 cm, algunas de ellas con rellenos de calcita. Existen intercalaciones con estratos de areniscas masivas, cuyos espesores varían desde 0.4 m hasta 1.5 m aproximadamente (Figura 45a y 45b). Estas rocas presentan un fracturamiento alto y la extensión entre fracturas varía en ocasiones desde 1 hasta 10 cm.



**Fig. 44.** Lutitas pertenecientes a la Formación Méndez altamente intemperizadas.

Las rocas lutíticas presentan foliación y estrías (Figura 46), que son producto del desplazamiento y la deformación de las rocas. Los espesores entre fracturas son muy variables, siendo desde menos de 1 mm hasta 3 cm. En ocasiones estas aperturas están rellenas de calcita, lo cual indica antiguas infiltraciones a través de ellas.



**Fig. 45a.** Bloques de areniscas en la parte alta de El Cerrito, con espesor de 1.50 m.



**Fig. 45b.** Bloques de areniscas intercaladas con lutitas altamente intemperizadas, mostrando una estratificación semi-horizontal.



**Fig. 46.** Lutita altamente fracturada, presenta estrías producto del desplazamiento y fricción de la roca.

### Depósitos Terciarios

Estos depósitos son compuestos por el material aluvial que fue transportado a través de antiguos cauces, como resultado del intemperismo y la erosión de las rocas que conforman la SMO. Estos conglomerados se depositaron formando planicies, que posteriormente se vieron modificadas en distintos niveles como respuesta a un levantamiento de la región por efectos tectónicos, formándose las terrazas aluviales que se localizan topográficamente en distintos niveles. En el área de estudio no es posible asociar ninguna terraza ya que el resto de las terrazas o niveles de conglomerados pertenecen a depósitos recientes.

### Depósitos Cuaternarios

El material aluvial producto del intemperismo y la erosión de las rocas que conforman la SMO transportado a través de antiguos cauces, pudo ser depositado formando planicies, las que posteriormente se vieron modificadas en distintos niveles como respuesta a un levantamiento de la región por efectos tectónicos, formándose las terrazas aluviales que se localizan topográficamente en distintos niveles (Ruiz, 1990).

Dentro del área de estudio se encuentran los depósitos aluviales que descansan discordantemente sobre la Formación Méndez. Se encuentran en forma horizontal sobre

el lecho del río Pablillo y se distribuyen hacia los lados formando cuatro diferentes niveles o terrazas aluviales. Estos fueron identificados mediante los recorridos realizados en campo.

#### Terraza 1

La terraza 1 descansa discordantemente a la Formación Méndez, es la terraza más antigua presente en la zona de estudio. Según Galván-Mancilla (1996) su espesor varía desde 2 a 23 m, están compuestos por material poco consolidado, formado por gravas, arenas, limos y arcillas intercalados. Muestran horizontes de gravas y algunos bloques y sus espacios son rellenados con arenas y algo de arcillas. Presenta una granulometría muy variable, el material de relleno, así como su espesor, la convierten en parte importante en la conexión hidráulica entre los escurrimientos superficiales y subterráneos, ya que todos los aprovechamientos hidráulicos monitoreados se encuentran en esta terraza (Figura 47).



**Fig. 47.** Sedimentos de la terraza 1 poco consolidados intercalados con material arcilloso.

## Terraza 2

Estos depósitos aluviales se localizan en los extremos del río Pablillo y sobre los pequeños arroyos dispersos por el área, está compuesta por gravas, arenas, arcillas y limos de espesor variable, cementados con material arcilloso color amarillento. Sobre esta terraza se encuentra gran actividad biológica, la cual presenta gran vegetación, al tener porosidad permite la concentración de la humedad permitiendo el crecimiento de raíces las cuales da un mayor soporte al material que conforma la terraza. En su superficie se encuentra cubierta por una capa de caliche de pocos centímetros, esto tiene relación a la gran cantidad de calizas presentes en la zona de estudio, su espesor varía entre 2 y 5 m (Figura 48).



**Fig. 48.** Terraza 2, presenta gran actividad biológica.

En la mayor parte del área se estima un considerable espesor de sedimentos aluviales pertenecientes a la T2, los cuales se presentan como una mezcla heterogénea de materiales desde bloques, gravas, arenas, arcillas y limos. Estos depósitos tienen una buena conductividad hidráulica, que va de  $3.15 \times 10^{-4}$  y  $3.4 \times 10^{-5}$  cm/s, por lo que se

localiza un acuífero fracturado con caudales considerables de 8.7 a 9.3 L/s (De La Garza, 2000). Con estas características hidrogeológicas y el antecedente de focos puntuales de contaminación, la pureza del agua y su composición puede ser alterada, ya que la conductividad hidráulica es alta y favorece la infiltración y desplazamiento de los fluidos contaminantes al acuífero.

### Sedimentos aluviales

Se deposita sobre el lecho de ríos y arroyos (Figura 49). Es la terraza más reciente, ya que actualmente los escurrimientos superficiales continúan depositando y retransportando el material. Es una alternancia de horizontes de gravas, espacios rellenos con arenas y horizontes de materiales finos como arcillas y limos sin consolidar que se encuentran aflorando sobre el lecho del río Camacho, presentan de manera esporádica compactación a través de los procesos de cementación. Su porosidad entre granos es tal, que interactúa con la T2 para favorecer la influencia y efluencia en la relación río-acuífero (Figura 50). Su espesor varía de 1 hasta 7 m.



**Fig. 49.** Sedimentos aluviales, terraza más joven, actualmente sigue recibiendo deposición de sedimentos a partir de material transportado por el cauce del río Camacho.

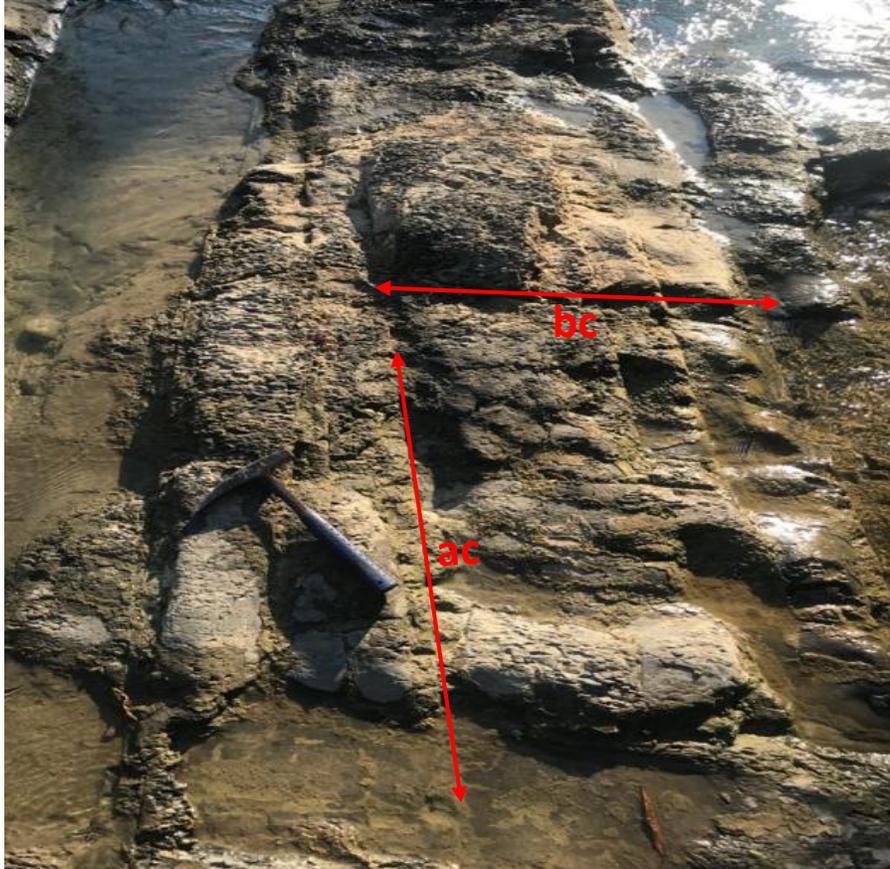


**Fig. 50.** Interacción entre la T2 y los sedimentos aluviales que permite una buena relación río-acuífero.

### 5.1.1 Geología estructural

Es de vital importancia estudiar el movimiento y transporte de fluidos y contaminantes a través de medios porosos y medios fracturados, ya que gracias a esto se podría lograr entender la ocurrencia de dichos fenómenos al igual que prevenir la contaminación del agua subterránea.

En El Cerrito se localizan afloramientos con una estratificación semi-horizontal, con un buzamiento de  $42^\circ$  hacia el SE y una dirección  $220^\circ$  al NE-SW. Este lomerío está conformado por rocas lutitas muy intemperizadas con un grado de fracturamiento muy alto. Existen intercalaciones de capas de areniscas con espesores gruesos hasta de 1.5 m. El fracturamiento predominante es del tipo “ac” y de menor magnitud un fracturamiento del tipo “bc” (Figura 51), en menor grado de importancia presenta un fracturamiento diagonal de tipo hk0.



**Fig. 51.** Fracturamiento predominante “ac” y “bc” en lutita Méndez.

Con base en las mediciones estructurales de rumbo y buzamiento tomados en campo se procedió al análisis estructural de las direcciones de fracturas gracias al programa digital Stereonet (Figura 52), en la Figura 53 se observa dichas fracturas representadas en la carta geológica-estructural de la zona de estudio.

Aunque la composición del macizo rocoso sea impermeable, la densidad del fracturamiento facilita la infiltración y el flujo del agua subterránea. Las fracturas que presentan aperturas entre ellas pueden aumentar el flujo, mientras que cuando estas están rellenas se forman barreras que impiden la infiltración (Odling y Roden, 1997). La apertura es la distancia perpendicular que separa a dos paredes de roca adyacentes de una discontinuidad abierta, en la que el espacio es relleno con aire o agua (Barton et al., 1978); por lo tanto, esta se distingue según el espesor de la discontinuidad (Tabla 7).

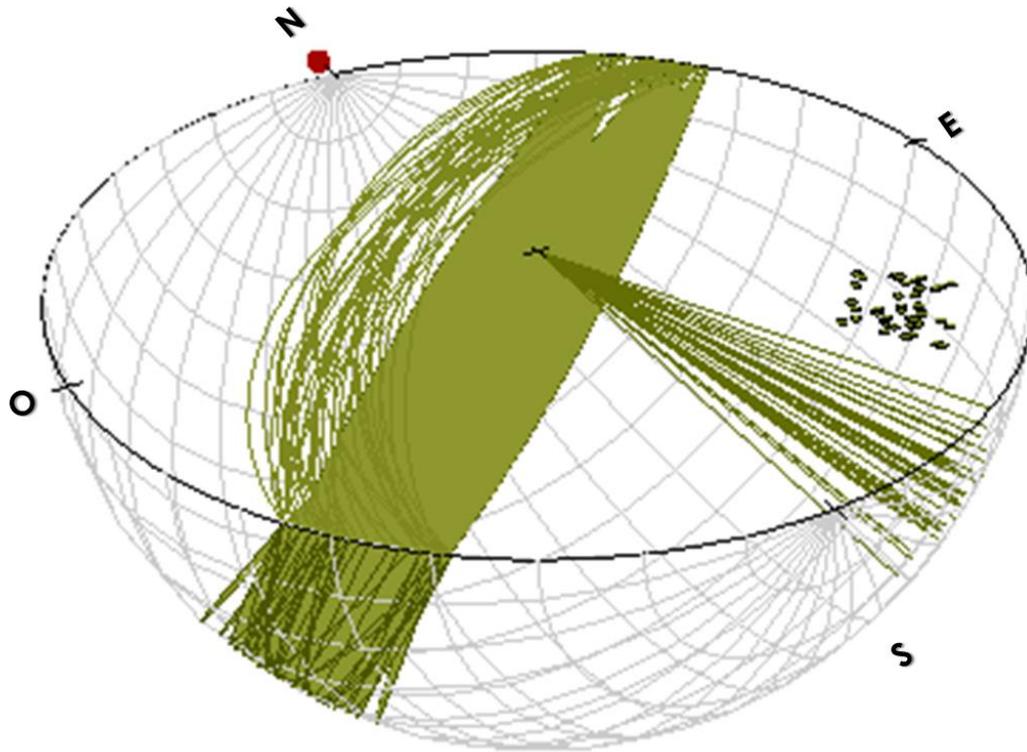


Fig. 52. Familias de fracturas presentes en la zona de estudio.

Tabla 7, descripción de las aperturas en base a su separación (tomado de Barton et al., 1978).

Apertura	Descripción	
< 0.1 mm	Muy cerrada	Cerrada
0.1 – 0.25 mm	Cerrada	
0.25 – 0.5 mm	Parcialmente abierta	
0.5 – 2.5 mm	Abierta	Abierta
2.5 – 10 mm	Moderadamente abierta	
> 10 mm	Muy abierta	
1 – 10 cm	Muy amplia	Caverna
10 – 100 cm	Extremadamente amplia	
> 1 m	Caverna	

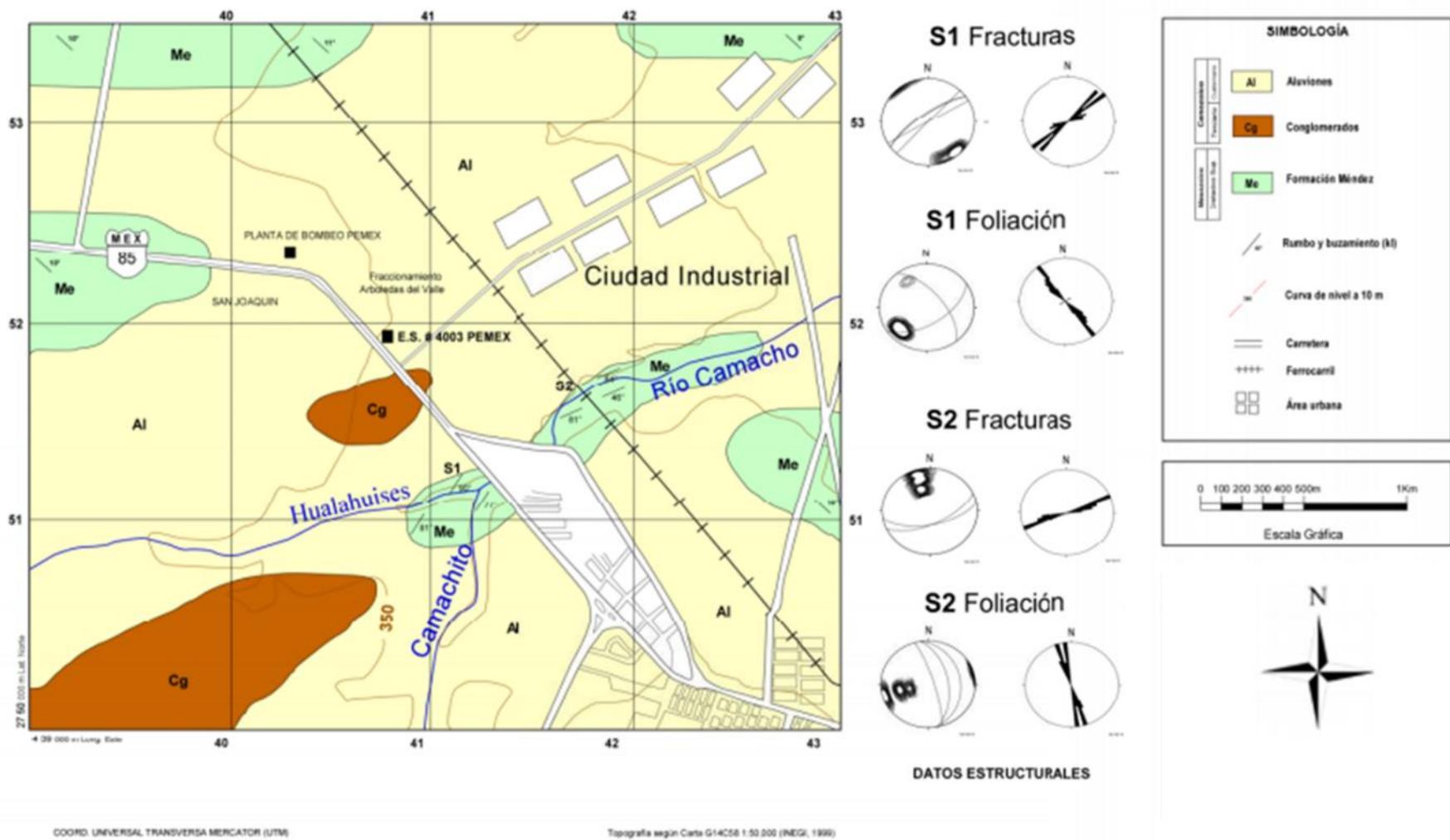


Fig. 53. Carta geológica – estructural del área de estudio (modificada de PAICYT 2006).

## 5.2 Hidrogeología

### 5.2.1 Cartas piezométricas

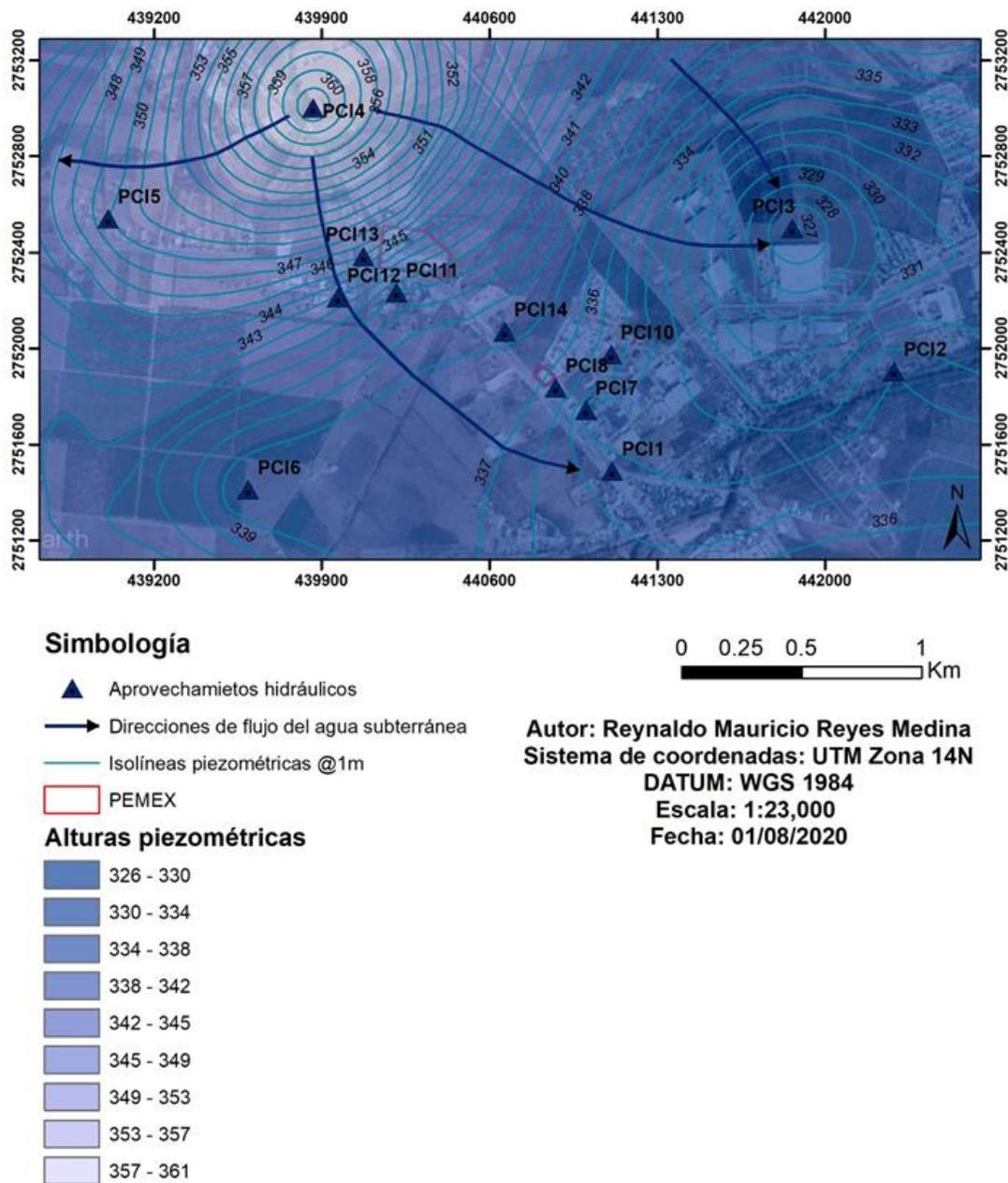
La evaluación de los recursos del agua subterránea, su comportamiento hidrodinámico y su disponibilidad para cubrir las necesidades de una población, deben formar parte esencial en la planeación de la administración actual y futura de los recursos hidrogeológicos de la zona. La presencia de asentamientos humanos en áreas donde la situación del medio geológico, el tipo de acuífero, la profundidad del agua subterránea y el uso de suelo se combinan, contribuyen a la alteración de la calidad del agua. Los acuíferos en el área de estudio son sometidos a presiones antropogénicas (fosas sépticas y letrinas, fugas de hidrocarburos de estaciones petroleras, actividad agrícolas e industrial, entre otros). Estas presiones se ven influenciadas temporalmente, ya que la composición química del agua varía de acuerdo a los períodos de máximas y mínimas precipitaciones ocurridas durante el año.

Una herramienta importante para la preservación de los acuíferos consiste en la implementación de redes de monitoreo que permitan un mejor control y la observación de fuentes de contaminación potencial, mediante las cuales se obtienen bases de datos que contribuyen a identificar áreas de vulnerabilidad y mantener un control de dichas fuentes potenciales.

Con base a las 4 mediciones tomadas de cada aprovechamiento hidráulico se realizó su correspondiente carta piezométrica, las cartas piezométricas obtenidas para el año 2020 fueron hechas en temporada de lluvia (Figura 54) y sequía (Figura 55), para el año 2021 fueron tomadas en temporada de sequía (Figura 56) y ordinario (Figura 57). Se mostró una dirección preferencial del flujo subterráneo de noreste a sureste. Partiendo del PCI 4 donde se presenta las mayores alturas piezométricas, las cuales disminuyen hacia el sureste.

El gradiente hidráulico (i) calculado para el mes de agosto del 2020 presentó un valor medio de 0.00157 (1.57 %), para el mes de noviembre del 2020 presentó un valor medio de 0.00039 (0.39 %), mientras que para el mes de febrero y mayo del 2021 se obtuvo un valor medio fue 0.00118 (1.18 %).

Durante las primeras mediciones realizadas en temporada de lluvia se obtuvo una carta piezométrica que nos indica un flujo preferencial de noreste a suroeste, sin embargo, también se encontró dirección del agua subterránea con dirección al noroeste partiendo del PCI 4 al PCI 5, cercanos a dichos pozos se encuentran muchas zonas que se dedican a la agricultura y ganadería, las cuales cuentan con diferentes pozos de los cuales se abastecen para sus actividades, por ende esta dirección del agua subterránea se relaciona con la extracción del recurso hídrico que están ejerciendo los pozos vecinos.



**Fig. 54.** Carta piezométrica equivalente al mes de agosto 2020.

Durante el mes de noviembre del 2020 se realizó la segunda medición de los diferentes aprovechamientos hidráulicos ubicados dentro de la zona de estudio, sus resultados indican una dirección predominante del agua subterránea de noreste a sureste, con dirección al río Camacho.

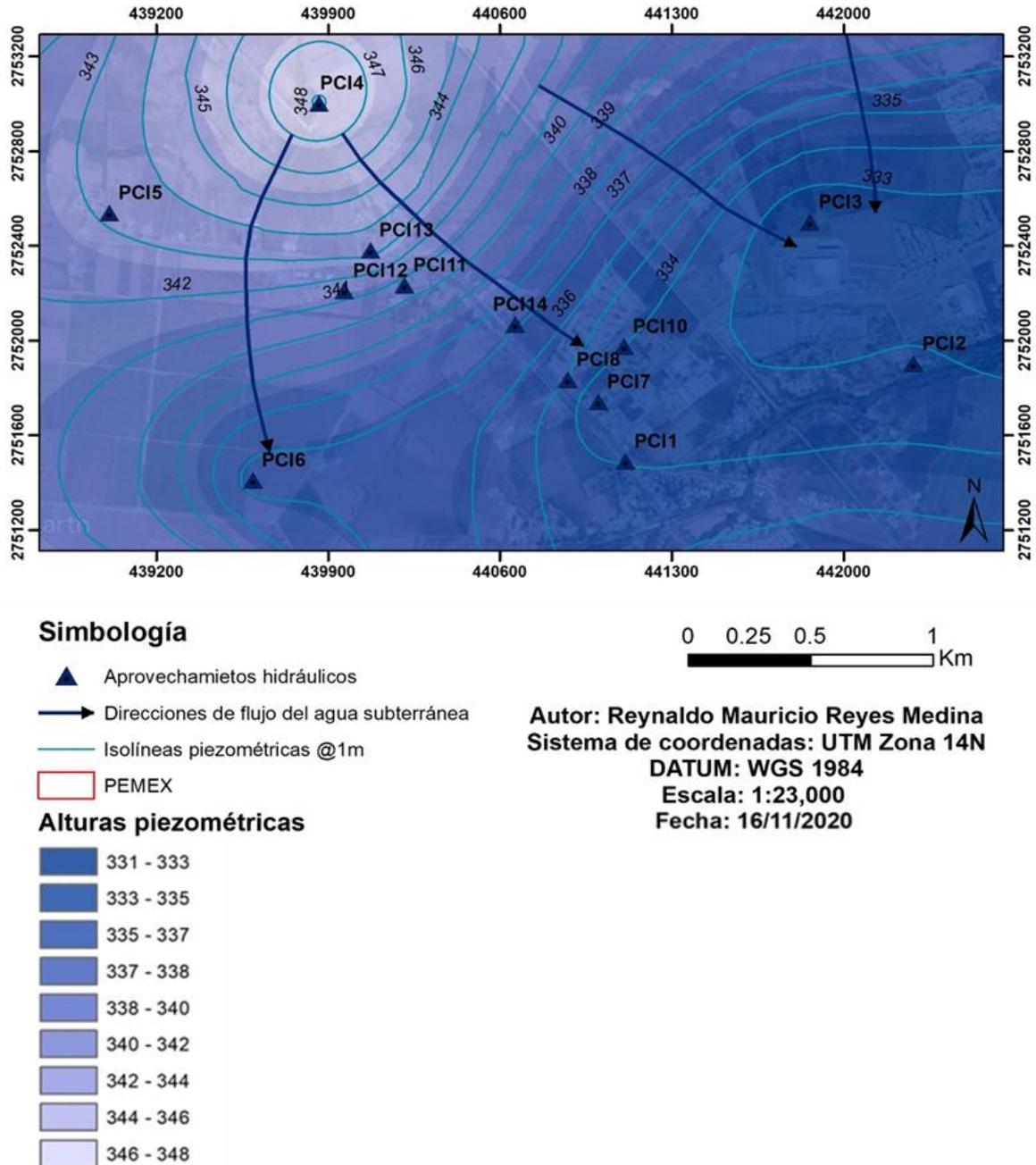


Fig. 55. Carta piezométrica equivalente al mes de noviembre 2020.

El resultado de las mediciones obtenidas en el mes de febrero del 2021 fueron tomadas en epoco de sequía, el resultado indicó que las direcciones de flujo del agua subterránea se mantuvieron de noreste a suroeste, con dirección al río Camacho.

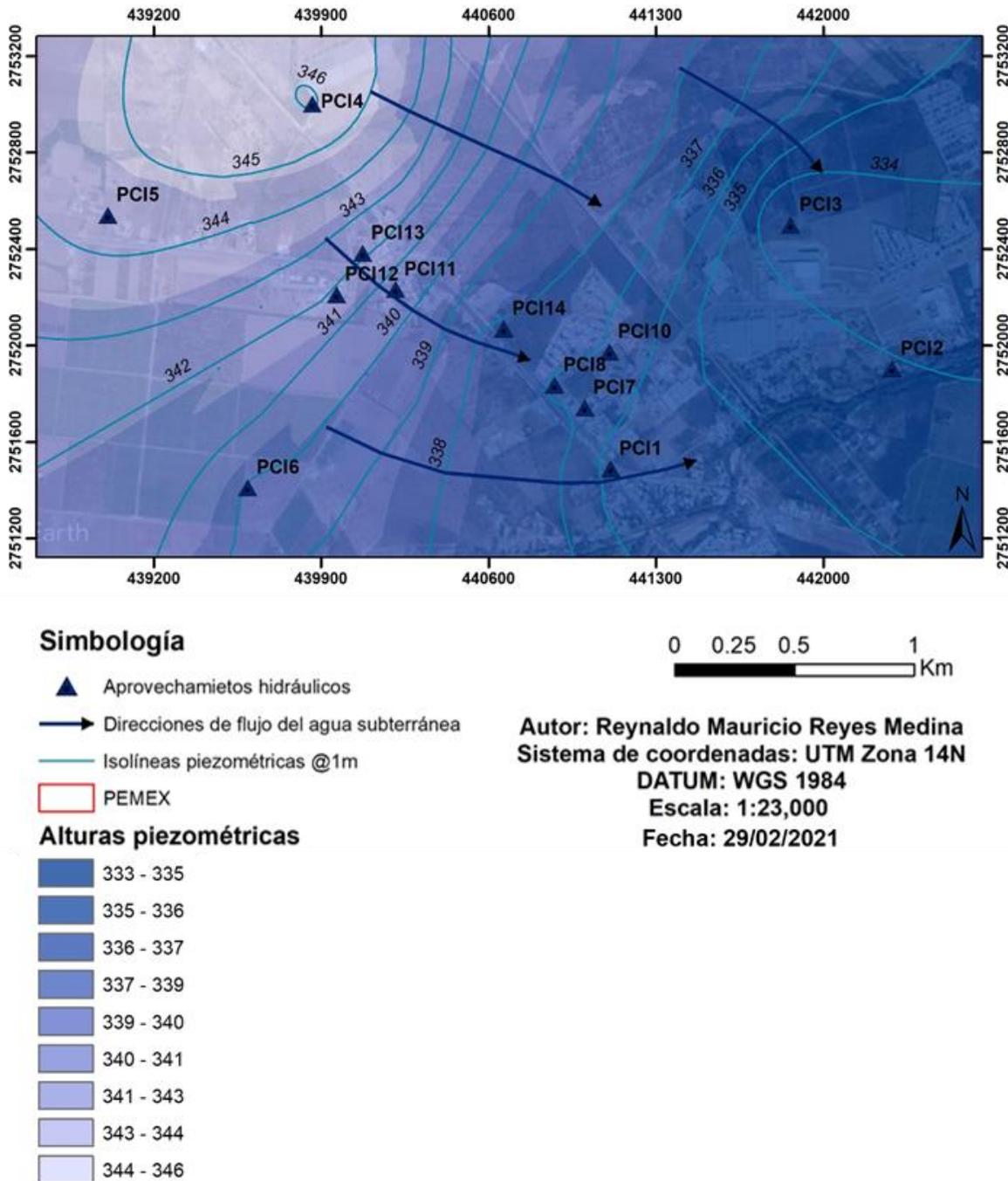


Fig. 56. Carta piezométrica equivalente al mes de febrero 2021.

La última medición tomada de los aprovechamientos hidráulicos fue durante el mes de mayo, en temporada ordinaria. Las direcciones de flujo del agua subterránea mostraron una dirección preferencial de noreste a sureste. En la Figura 58, podemos observar que el PCI 3 muestra una concentración de las isolíneas, lo cual nos indica una extracción del recurso hídrico, cabe mencionar que dicho aprovechamiento se encuentra dentro de la ciudad industrial de Linares, muchas industrias cuentan con sus propios pozos de los cuales hacen un uso excesivo diario, por ello, podemos asociar dicha concentración.

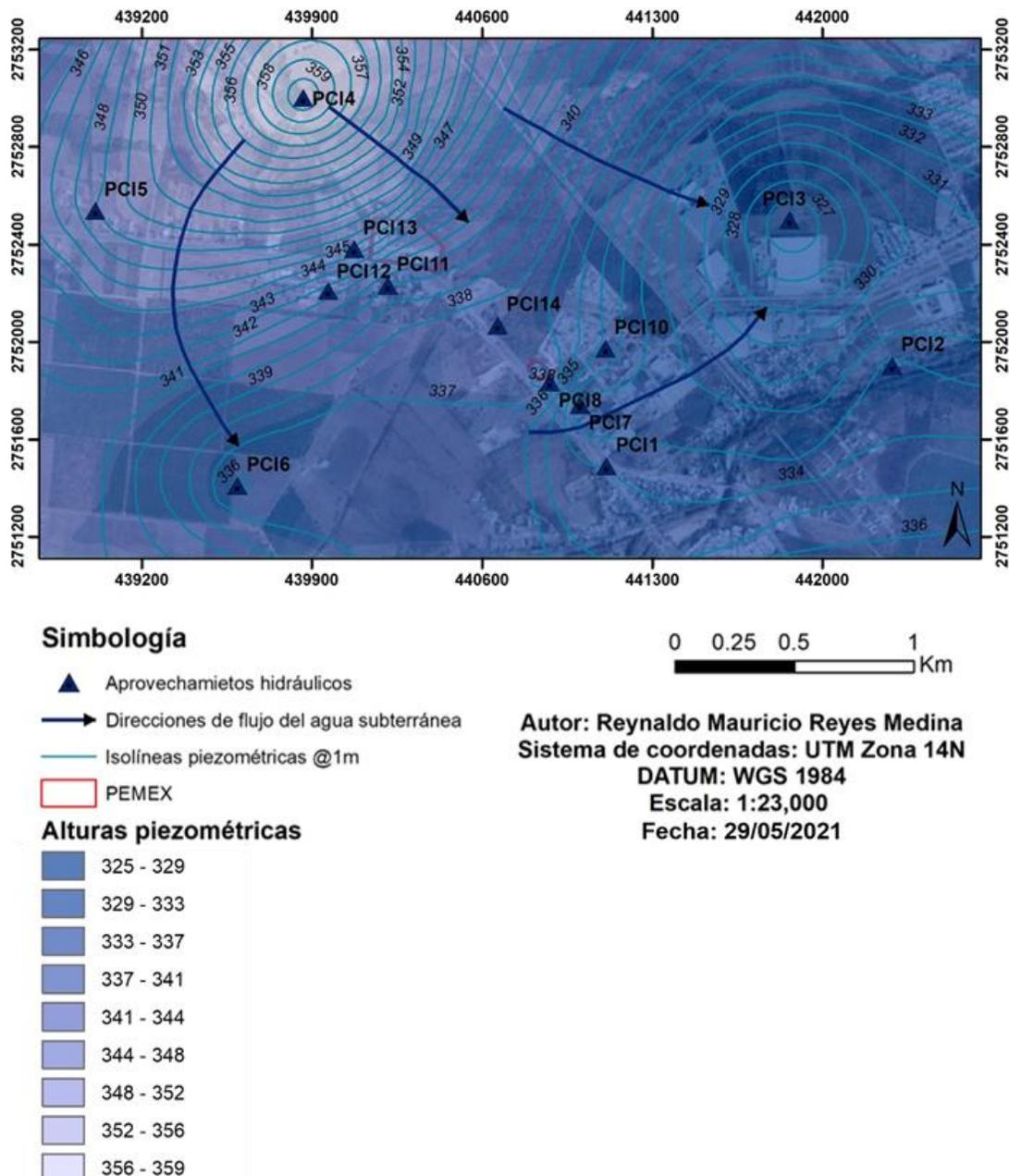


Fig. 57. Carta piezométrica equivalente al mes de mayo 2021.

## 5.3 Química del agua

### 5.3.1 Parámetros fisicoquímicos *in situ*

Se realizaron diferentes análisis fisicoquímicos para determinar los factores que influyen directamente en la calidad del agua subterránea. La conductividad eléctrica y temperatura son 2 parámetros que se midieron *in situ* gracias a la sonda acústica Solinst Modelo 107. Con los resultados obtenidos se realizó una comparación entre diversas normas nacionales e internacionales para evaluar la calidad del agua subterránea en la zona de estudio.

#### 5.3.1.1 Conductividad eléctrica

En la Figura 58, se presenta un promedio de las cuatro mediciones tomadas de conductividad eléctrica a cada aprovechamiento hidráulico en campo.

Los valores de conductividad eléctrica oscilaron entre un intervalo de 5 407 a 6 535  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ . Destacando que los valores más elevados se encontraron en el pozo PCI 11 con un valor de 6 535  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  y el pozo PCI 8 con un valor de 6 266  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ . Estas concentraciones se atribuyen a la ubicación de los pozos, los cuales se encuentran a pocos metros de las estaciones de PEMEX.

Los valores de conductividad eléctrica también se encuentran asociados a las formaciones geológicas que se encuentra en la zona de estudio, los cuales corresponden a suelos calcáreos, lo que genera una concentración elevada de sales.

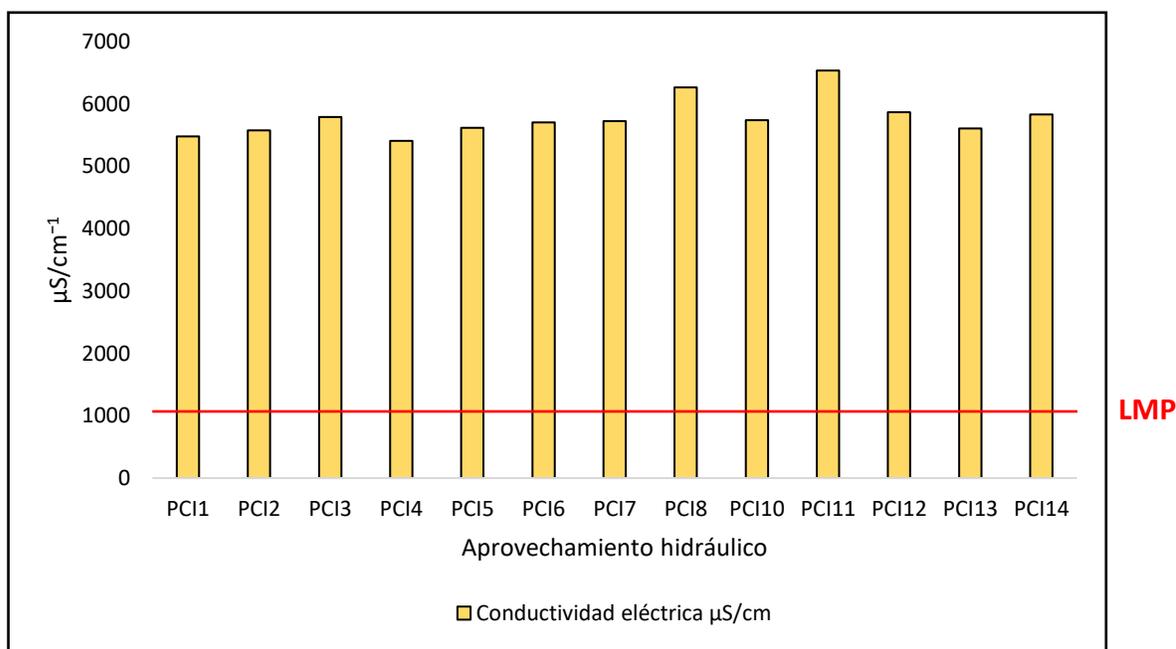
Aplicando la escala de Gómez (2018) para la clasificación del tipo de agua por medio de su conductividad eléctrica, se pudo determinar el tipo de agua subterránea que se tiene en la zona de estudio, con base en los resultados obtenido se identificó la presencia de un agua moderadamente salada/salobre (Tabla 8), lo cual es congruente con el estrato rocoso calcáreo y la dinámica del flujo subterráneo.

Tabla 8. Clasificación de aguas naturales por su conductividad eléctrica de acuerdo a Gómez (2018).

Clasificación de aguas naturales	
Tipo de agua	Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ )
Agua potable	< 1 400
Agua ligeramente salada/Salobre	1 400 - 4 000
Agua moderadamente salada/Salobre	4 000 - 14 000
Salada	14 000 - 50 000
Salmuera	> 50 000

El incremento de conductividad y, por lo tanto, de la salinidad del agua, afecta gravemente el ecosistema fluvial, llegando incluso a una fuerte reducción de la biodiversidad (Ecofluidos Ingenieros, S. A., 2012).

De acuerdo con la OMS, establece para agua potable un Límite Máximo Permissible (LMP) de  $1\,000\ \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ , mientras el Real Decreto 140/2003 establece un LMP de  $2\,500\ \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ . En la Figura 58, podemos observar que todos los pozos se encuentran por arriba del límite máximo establecido para ambas normas, lo cual nos indica una gran concentración iónica.



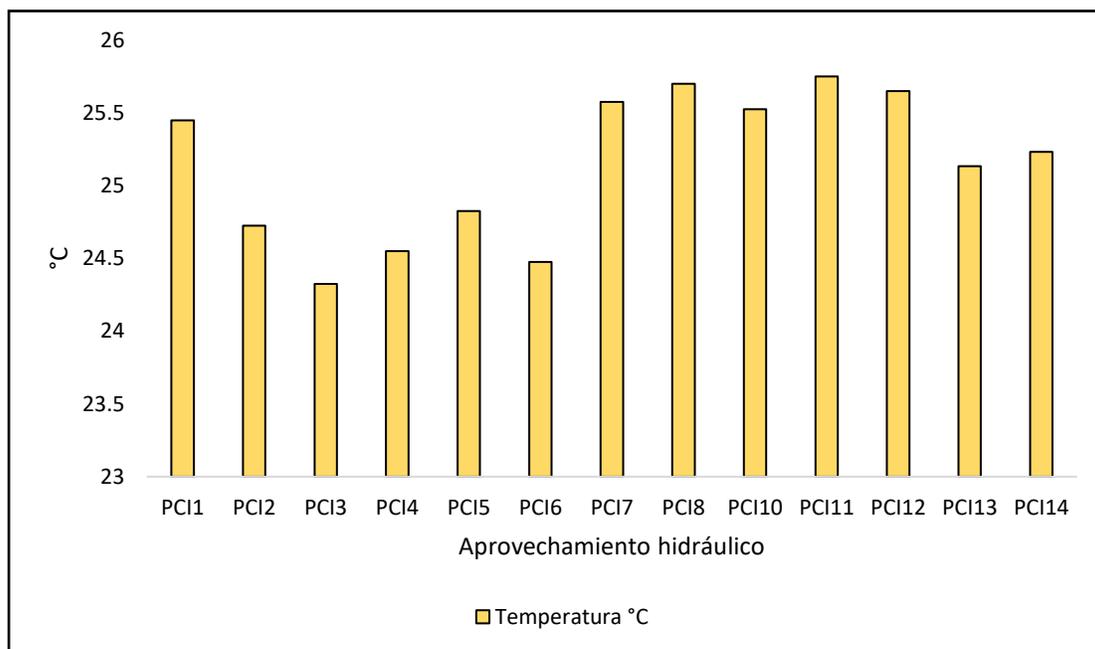
**Fig. 58.** Resultado del promedio de las 4 mediciones tomada de conductividad eléctrica a los aprovechamientos hidráulicos en campo en diferente temporada.

### 5.3.1.2 Temperatura

En la Figura 59, se presenta un promedio de las cuatro mediciones tomadas de temperatura a cada aprovechamiento hidráulico en campo.

Los valores de temperatura oscilaron entre un intervalo de 24.3 a 25.8 °C. Destacando que los valores más elevados se encontraron en el pozo PCI 11 con un valor de 25.8 °C y el PCI 8 y PCI 12 con un valor de 25.7 °C, lo cual concuerda con la temperatura ambiente en la zona de estudio. A su vez, la temperatura de las aguas subterráneas depende de las características del terreno, pudiendo ser influenciada, entre otras causas, por la naturaleza de las rocas, siendo además función de la profundidad (Catalán, 1969).

Es necesario conocer el parámetro de temperatura ya que esta influye en la cantidad de oxígeno disuelto en el agua y a mayor temperatura se acelera el proceso fotosintético, así como la remoción de materia orgánica (Metalf & Eddy, 1995; APHA-AWWA-WPCF, 1989).



**Fig. 59.** Resultado del promedio de las 4 mediciones tomada de temperatura a los aprovechamientos hidráulicos en campo en diferente temporada.

### 5.3.2 Parámetros fisicoquímicos en laboratorio

Se realizaron diferentes análisis fisicoquímicos para determinar los factores que influyen directamente en la calidad del agua subterránea. Con los resultados obtenidos se realizó

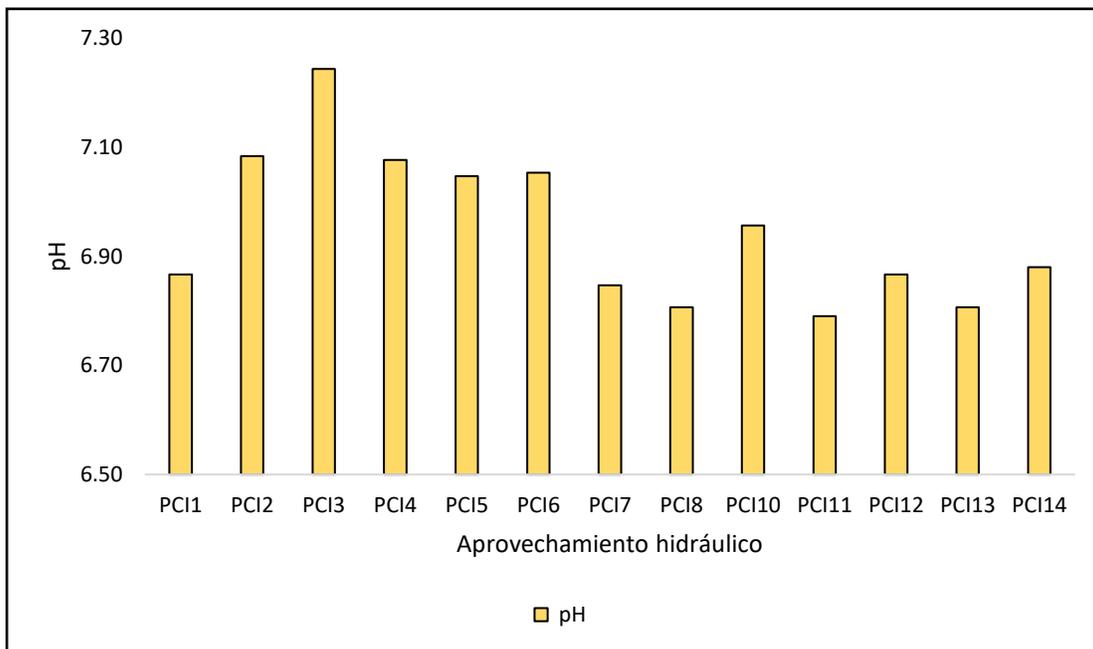
una comparación entre diversas normas nacionales e internacionales para evaluar la calidad del agua subterránea en la zona de estudio y así conocer el grado de impacto ambiental que se está teniendo, ya sea por contaminación natural o antropogénica.

### 5.3.2.1 Potencial de Hidrógeno (pH)

El pH del agua nos indica la calidad de la misma, en la Figura 60, se presentan los resultados obtenidos de pH de cada aprovechamiento hidráulico, parámetro analizado a partir de las muestras de agua subterránea tomadas en campo.

Los valores de pH oscilaron entre 6.79 y 7.24, cabe mencionar que el pH de las aguas subterráneas en la zona de estudio se encuentra dentro del intervalo de pH de las aguas subterráneas, el cual está entre 6.5 y 8 (Pérez & Ramírez, 2008; García Gonzales, 2017).

Para agua potable la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece un rango de aceptación de 6.0 a 8.5, a su vez Zamora, J. (2009), destaca que el agua potable debe estar entre 6.5 y 8.5. Por lo cual los valores obtenidos se encuentran dentro los LMP.



**Fig. 60.** Resultados de pH obtenidos a partir de las muestras recolectadas de agua subterránea.

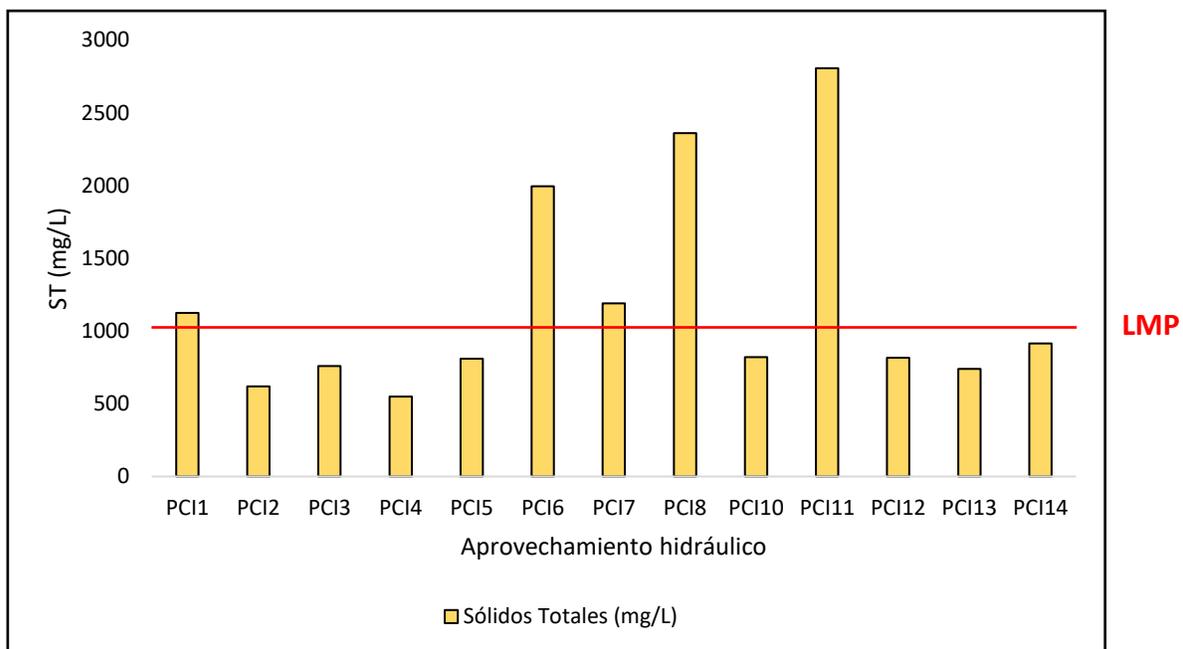
### 5.3.2.2 Sólidos Totales (ST)

Todas las aguas contienen sustancias disueltas en cantidades variables que dependen de su origen. El agua puede contener varios tipos de sólidos, entre ellos, sólidos disueltos y los sólidos suspendidos. Los sólidos más importantes para establecer la calidad del agua son los sólidos totales, sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos totales.

En la Figura 61, se presentan los resultados obtenidos de ST de cada aprovechamiento hidráulico, parámetro analizado a partir de las muestras de agua subterránea tomadas en campo.

Los valores de ST oscilaron entre 550 y 2 805 mg/L, los valores más elevados fueron encontrados en el PCI 11 con un valor de 2 805 mg/L y el PCI 8 con un valor de 2 360 mg/L.

Para agua potable la Norma Mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece un valor máximo de 1 000 mg/L de ST. Los sólidos son importantes en altas concentraciones debido a que afectan directamente sobre los procesos de tratamiento en la etapa de filtración. En la Figura 61 podemos observar que 5 pozos se encuentran sobrepasando el LMP.



**Fig. 61.** Resultados de ST obtenidos a partir de las muestras recolectadas de agua subterránea.

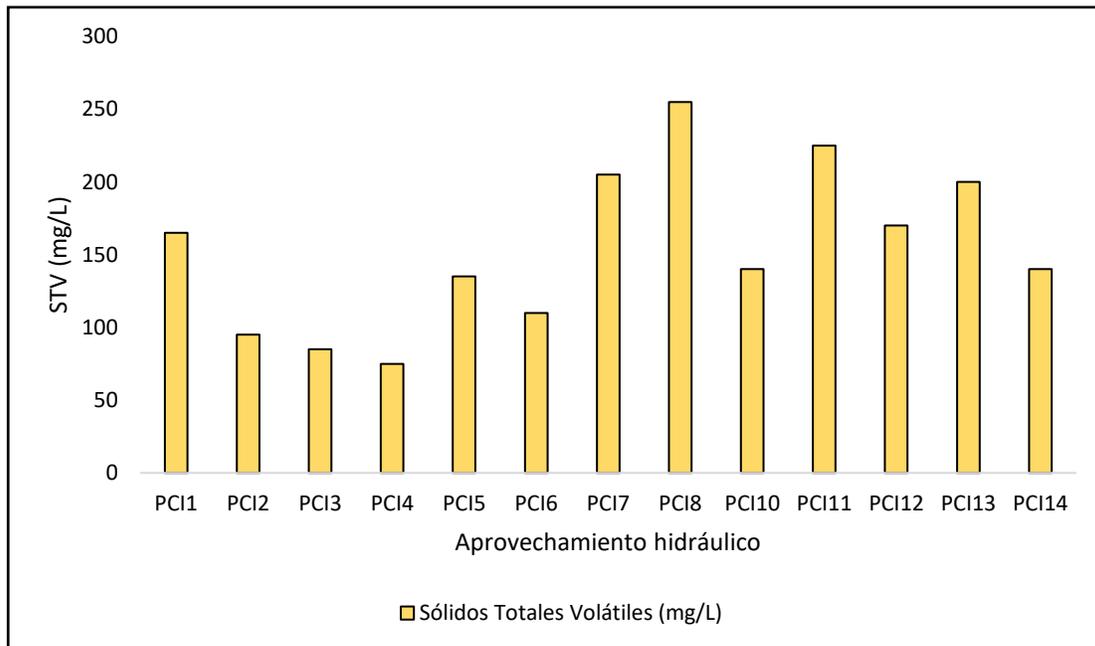
### 5.3.2.3 Sólidos Totales Volátiles (STV)

La determinación de STV es útil para el control de procesos, ya que nos ofrece un cálculo aproximado de la cantidad de materia orgánica presente en la fracción sólida del agua residual.

En la Figura 62, se presentan los resultados obtenidos de STV de cada aprovechamiento hidráulico, parámetro analizado a partir de las muestras de agua subterránea tomadas en campo.

Los valores de STV oscilaron entre 75 y 255 mg/L, los valores más elevados fueron encontrados en el PCI 8 con un valor de 255 mg/L, el PCI 11 con un valor de 225 mg/L, el PCI 7 con un valor de 205 mg/L y el PCI 13 con un valor de 200 mg/L.

Para este parámetro no existe un valor establecido por la Norma Mexicana NOM-127-SSA-1-1994 para agua potable, ya que estos son medidos principalmente en muestras sólidas.



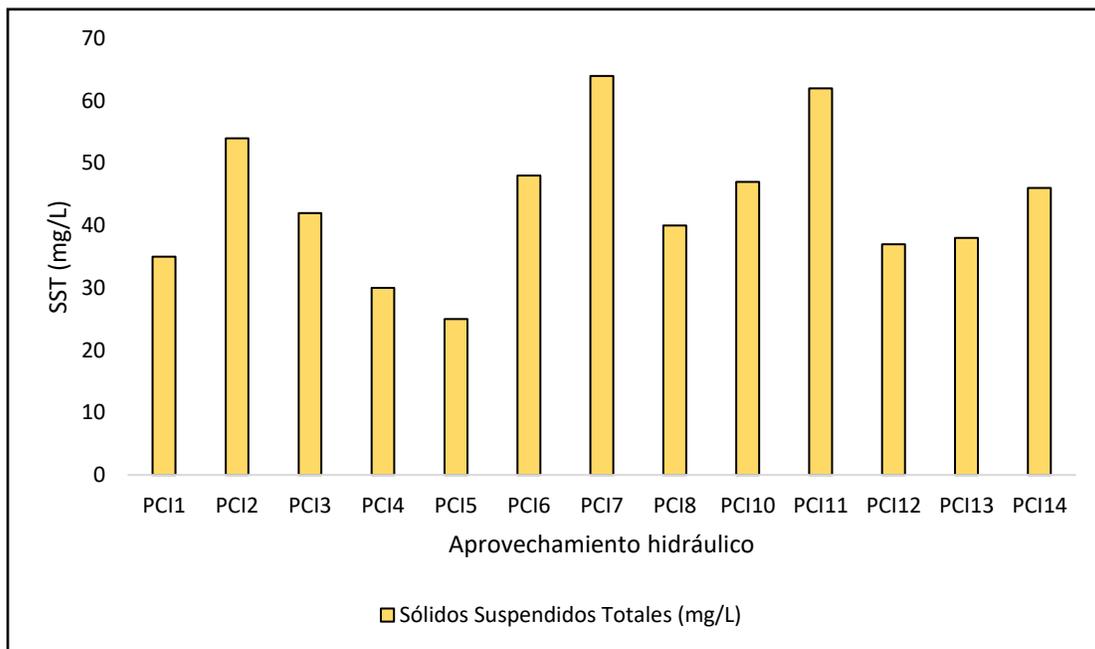
**Fig. 62.** Resultados de STV obtenidos a partir de las muestras recolectadas de agua subterránea.

### 5.3.2.4 Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Los Sólidos Suspendidos Totales (SST), representa la cantidad de partículas que se mantienen en suspensión en las corrientes de agua superficial, subterránea y/o residual, también son los principales responsables de la turbiedad en ella. A su vez, permite evaluar la calidad del agua disponible para los consumidores en los municipios o comunidades (CAN, 2005).

En la Figura 63, se presentan los resultados obtenidos de SST de cada aprovechamiento hidráulico, parámetro analizado a partir de las muestras de agua subterránea tomadas en campo.

Los valores de SST oscilaron entre 25 y 64 mg/L, cabe mencionar que los valores de SST que presentaron las muestras de agua subterránea de la zona de estudio se encuentran por debajo de los LMP según la NOM-001-ECOL-1996, la cual establece como LMP 75 – 150 mg/L de SST para su uso público urbano y de riego.



**Fig. 63.** Resultados de SST obtenidos a partir de las muestras recolectadas de agua subterránea.

### 5.3.2.5 Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)

Los resultados de SSV fueron negativos, no existe presencia de ellos en las muestras de agua.

### 5.3.2.6 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

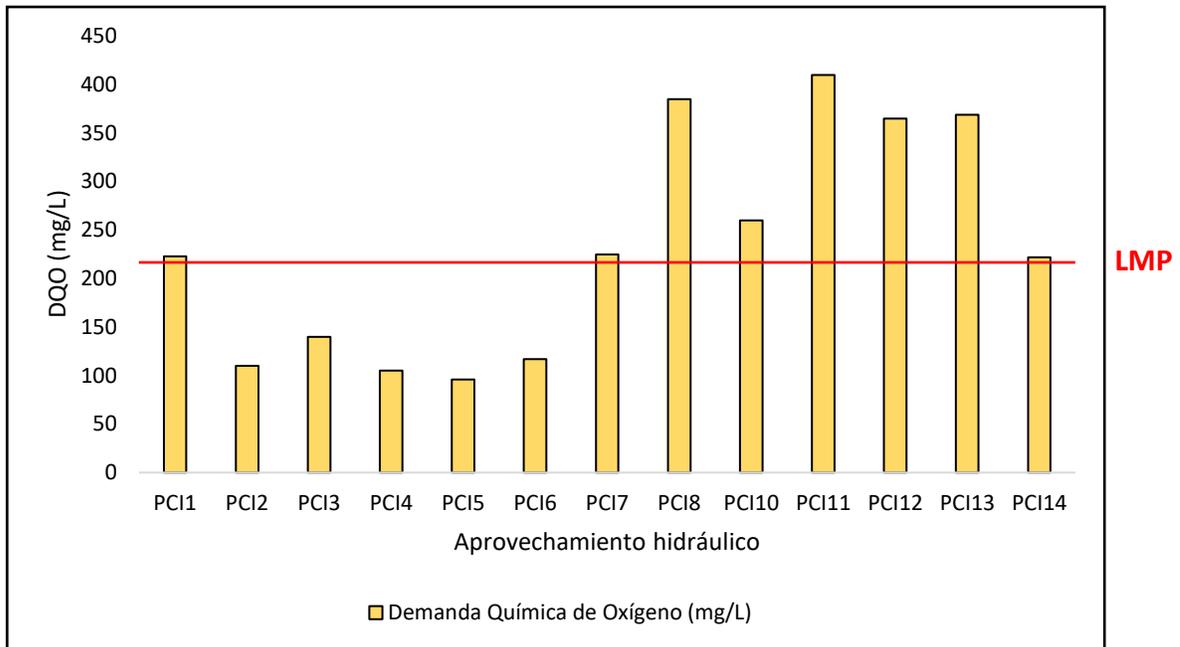
La Demanda Química de Oxígeno (DQO) determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua por medios químicos y convertirla en CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo. Cuanto mayor es la DQO, más contaminada está el agua. Dicha contaminación se puede deber a la acumulación de pesticidas, colorantes, hidrocarburos, compuestos fenólicos, entre otros.

En la Figura 64, se presentan los resultados obtenidos de DQO de cada aprovechamiento hidráulico, parámetro analizado a partir de las muestras de agua subterránea tomadas en campo.

Los valores de DQO oscilaron entre 96 y 410 mg/L, los valores más elevados fueron encontrados en el PCI 11 con un valor de 410 mg/L, el PCI 8 con un valor de 385 mg/L, el PCI 13 con un valor de 369 mg/L y el PCI 12 con un valor de 365 mg/L. Estos resultados evidencian la evolución de fenómenos biogeoquímicos en el agua subterránea, resultado de la contaminación antropogénica producida en la zona de estudio. Los aprovechamientos hidráulicos que presentaron mayor concentración de DQO se encuentran muy cercanos a las estaciones de PEMEX, también se coincide con la dirección de flujo.

La Norma Oficial Mexicana para agua potable no establece una concentración máxima permitida de DQO en el agua subterránea. Sin embargo, los resultados fueron evaluados con respecto al proyecto de modificación de la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017 que establece un LMP para ríos, arroyos y canales de 210 mg/L.

En la Figura 64, podemos observar que 8 pozos superan el LMP establecido, cabe destacar que los pozos que presentaron una concentración más elevada de DQO se encuentran muy cercanos a las estaciones de PEMEX, sin embargo, otros 4 pozos también se encuentran por arriba del LMP, esto confirma la contaminación no solamente por parte de la industria petrolera, sino también por parte de las industrias ubicadas dentro de la ciudad industrial de Linares, N. L.



**Fig. 64.** Resultados de DQO obtenidos a partir de las muestras recolectadas de agua subterránea.

### 5.3.2.7 Iones mayoritarios

#### 5.3.2.7.1 Fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ )

La vida depende de la proporción de nitrógeno (N) y fósforo (P) que está disponible en el medio ambiente. Normalmente hay mucho más nitrógeno que fósforo, y las especies han evolucionado para vivir en estas condiciones. Pero, si esta proporción se altera, los organismos reducen su capacidad de crecimiento y mantenimiento de las funciones vitales. En estudios recientes se ha constatado que esta proporción se está alterando en los cuerpos de agua donde existe mayor población, la cual genera una mayor actividad humana.

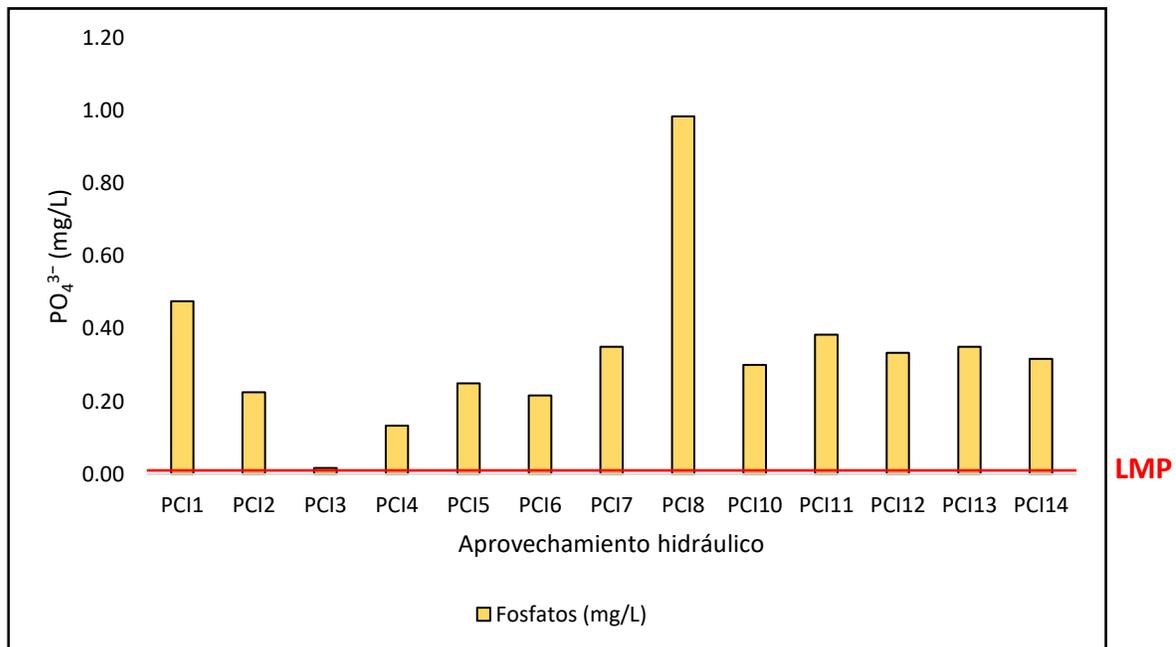
Con el vertido continuo de detergentes, pesticidas, fertilizantes y aguas residuales urbanas e industriales se está añadiendo cantidades desorbitadas de fósforo, que se está acumulando mucho más rápidamente que el nitrógeno (y que otros elementos). Así, el fósforo ha pasado de ser un nutriente deseable a ser un contaminante en las regiones urbanas más densamente pobladas y en las áreas con agricultura intensiva. Es por ello,

que el monitoreo de fosfatos y de nitrógeno es importante, debido a que estos parámetros también causan el crecimiento de algas y cianobacterias (Sawyer et. al, 2000).

En la Figura 65, se presentan los resultados obtenidos de  $\text{PO}_4^{3-}$  de cada aprovechamiento hidráulico, parámetro analizado a partir de las muestras de agua subterránea tomadas en campo.

Los valores de  $\text{PO}_4^{3-}$  oscilaron entre 0.02 y 0.98 mg/L, para agua subterránea, el valor más elevado fue encontrado en el PCI 8 con un valor de 0.98 mg/L.

La Norma Oficial Mexicana para agua potable no establece una concentración máxima permitida de nitrógeno total en el agua subterránea. Sin embargo, los resultados fueron evaluados con respecto a los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua que establece un LMP para ríos, arroyos y canales de 0.05 mg/L. Cabe mencionar que todos los pozos se encuentran por arriba del LMP, lo cual nos confirma una contaminación mayormente antropogénica por los procesos que son llevados en la zona de estudio, tanto actividad petrolera como la actividad industrial en general.



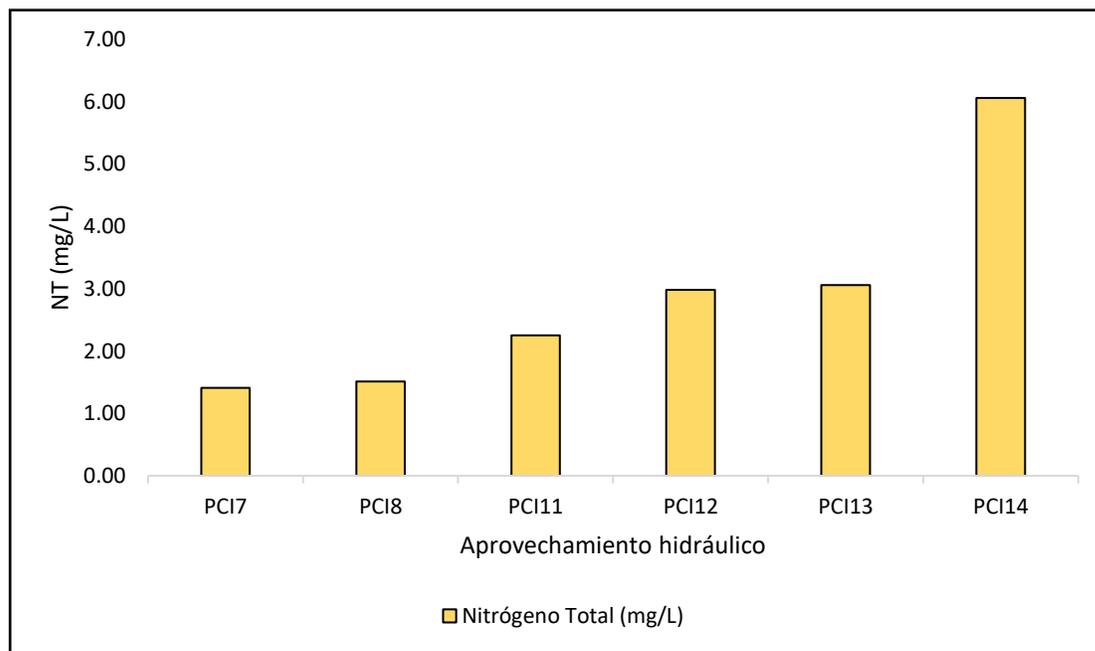
**Fig. 65.** Resultados de  $\text{PO}_4^{3-}$  obtenidos a partir de las muestras recolectadas de agua subterránea.

### 5.3.2.7.2 Nitrógeno Total (NT)

El nitrógeno total corresponde a la suma de las concentraciones de nitrógeno Kjeldahl, nitritos y nitratos, representan los diferentes grados de degradación de proteínas, ácido nucleico o lixiviación que puede contaminar el acuífero.

En la Figura 66, se presentan los resultados obtenidos de NT de cada aprovechamiento hidráulico, parámetro analizado a partir de las muestras de agua subterránea tomadas en campo.

Los valores de NT oscilaron entre 1.41 y 6.06 mg/L, para agua subterránea, el parámetro como NT no tiene un valor establecido por la Norma Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para agua potable, sin embargo, los resultados fueron evaluados con respecto al proyecto de modificación de la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017 que establece un LMP de 35 mg/L. Cabe destacar que todas las muestras de agua subterránea que se analizaron se encuentran por debajo de los LMP según la norma.



**Fig. 66.** Resultados de NT obtenidos a partir de las muestras recolectadas de agua subterránea.

### 5.3.2.7.3 Balance de neutralidad

#### 5.3.2.7.3.1 Valoración de resultados

Previo a la interpretación de los resultados de los análisis fisicoquímicos de iones mayoritarios de las muestras de agua subterránea, es conveniente realizar un análisis para validar la confiabilidad de los resultados de los elementos químicos analizados. El balance de electroneutralidad es usado para el caso específico de elementos mayores. Dicho proceso es descrito a continuación.

El balance de electroneutralidad (Freeze y Cherry, 1979) utiliza la suma de aniones y suma de cationes en miliequivalente/litro con lo que establece un porcentaje de error de  $\pm 5\%$ . Dicho balance se aplicó a los resultados obtenidos de los iones mayores (aniones y cationes), usando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ error} = \left( \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} \right) \times 100$$

Cabe mencionar, que los valores que se utilizaron para realizar el balance de neutralidad fueron los resultados de las determinaciones de aniones:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  hechas en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería Civil/UANL y los resultados de las determinaciones de cationes:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  hechos por Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la Facultad de Ingeniería/UASLP.

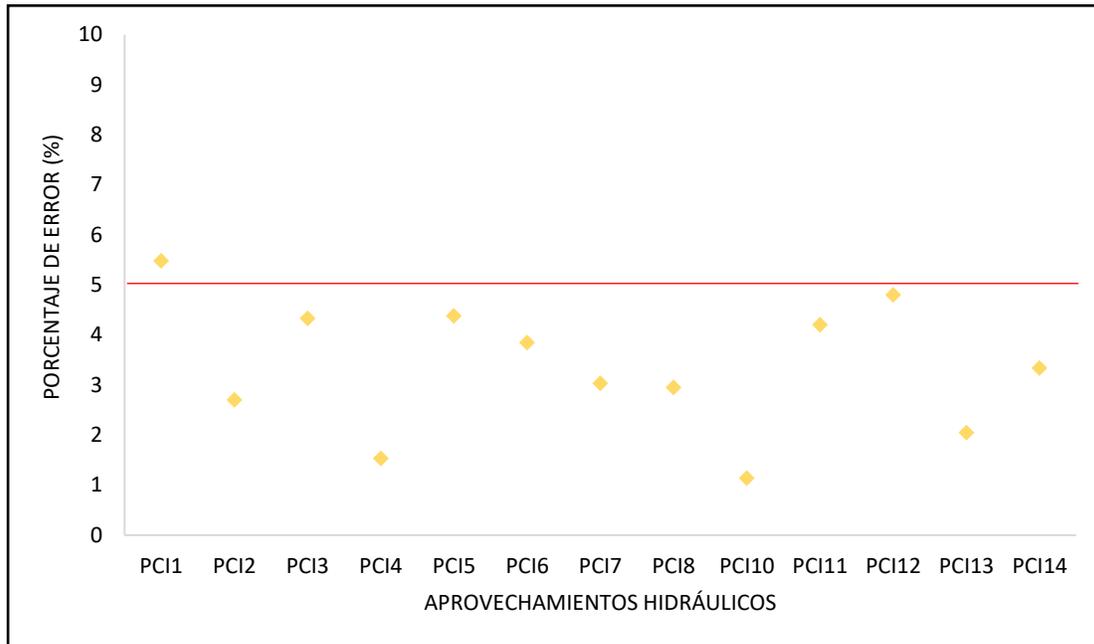
El análisis de confiabilidad arrojó los resultados que se encuentran representados en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados de porcentaje de error del balance de electroneutralidad.

Porcentaje de error													
POZO	PCI 1	PCI 2	PCI 3	PCI 4	PCI 5	PCI 6	PCI 7	PCI 8	PCI 10	PCI 11	PCI 12	PCI 13	PCI 14
	5.48	2.7	4.33	1.53	4.38	3.85	3.03	2.95	1.14	4.2	4.8	2.05	3.34

De las 13 muestras analizadas, el 92.3 % se encuentran dentro del rango de error que va de 0 a  $\pm 5\%$ ; de este modo, queda demostrado que los datos obtenidos para los elementos mayores son confiables.

La Figura 67, muestra con mayor detalle la distribución del total de las muestras de agua subterránea.



**Fig. 67.** Representación de los porcentajes de error considerados en el balance de neutralidad.

### 5.3.2.7.3.2 Familias de agua

Los resultados de los análisis fisicoquímicos de las aguas subterráneas tomadas en campo se pueden representar y analizar por métodos gráficos, tales como diagramas hidroquímicos (Piper) que son utilizados para realizar la comparación de los análisis de las diferentes muestras de agua. Mediante el programa digital Diaggrames fue posible representar gráficamente las familias de agua que existen en la zona de estudio.

### 5.3.2.7.3.3 Diagrama de Piper

El diagrama de Piper consiste en dos triángulos equiláteros y un rombo centrado entre los triángulos. Cada esquina de los triángulos tiene asignado los 3 iones mayoritarios, uno para cationes ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $(\text{Na}^{+}+\text{K}^{+})$ ) y el otro para aniones ( $\text{CO}_3+\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$  y  $\text{Cl}^{-}+\text{NO}_3^{-}$ ). Los valores se representan mediante los porcentajes de concentración de los iones en  $\text{meq L}^{-1}$  en forma de un punto en ambos triángulos, los cuales se proyectan de forma diagonal hacia el rombo, determinando la familia de agua de la muestra mediante



magnésica lo cual está relacionado con la geología del lugar, donde la roca caliza se disuelve mayormente debido a las precipitaciones, formando bicarbonatos a causa de la interacción de CO<sub>2</sub> con carbonatos de calcio. Cabe mencionar, que pueden existir cambios en las familias de agua, sucesos como temporada alta de lluvias o actividad antropogénica pueden provocar un cambio en la composición química del agua subterránea y de la facie hidrogeoquímica.

En la Tabla 10, se presentan las clasificaciones de Piper en agua subterránea de cada aprovechamiento perteneciente a la zona de estudio.

Tablo 10. Clasificación de Piper en agua subterránea.

Pozo	Clasificación de aguas subterráneas
PCI 1	Cloruradas sulfatada cálcica - magnésica
PCI 2	Bicarbonatada cálcica - magnésica
PCI 3	Bicarbonatada cálcica - magnésica
PCI 4	Bicarbonatada cálcica - magnésica
PCI 5	Bicarbonatada cálcica - magnésica
PCI 6	Cloruradas sulfatada cálcica - magnésica
PCI 7	Bicarbonatada cálcica - magnésica
PCI 8	Bicarbonatada cálcica - magnésica
PCI 10	Bicarbonatada cálcica - magnésica
PCI 11	Bicarbonatada cálcica - magnésica
PCI 12	Cloruradas sulfatada cálcica - magnésica
PCI 13	Bicarbonatada cálcica - magnésica
PCI 14	Bicarbonatada cálcica - magnésica

#### 5.3.2.7.4 Determinación de BTEX

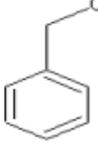
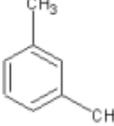
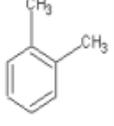
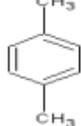
Los BTEX son uno de los grupos principales de los compuestos orgánicos solubles que se encuentran en el suelo y en el agua subterránea. La fuente más común para la contaminación por BTEX son los derrames de productos de petróleo tales como la gasolina, diésel, lubricantes y aceites producto de filtraciones de los tanques de almacenamiento. Debido a sus características de polaridad y solubilidad, los BTEX son capaces de entrar en el suelo y en el agua subterránea y causar serios problemas de contaminación (Christensen & Elton, 1996).

El grupo de contaminantes BTEX, representan un porcentaje significativo de los productos derivados de petróleo. La razón por la que son considerados un serio problema

es porque todos ellos tienen efectos tóxicos agudos y crónicos, además se conoce que el benceno es cancerígeno (Christensen & Elton, 1996).

En la tabla 11 se resume las características de los componentes analizados cuyas propiedades se describen a continuación (EPA, 1996; Christensen & Elton, 1996; Apello & Postma, 1999):

Tabla 11. Características de los compuestos benceno, tolueno, etilbenceno y 3 isómeros de xilenos (modificada de Christensen & Elton, 1996).

Compuesto	Benceno	Tolueno	Etilbenceno	m-Xileno	o-Xileno	p-Xileno
Estructura Química						
Formula Química	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>
Peso Molecular (g mol <sup>-1</sup> )	78	92	106	106	106	106
Solubilidad en agua (mg l <sup>-1</sup> )	1700	515	152	-	175	198
Presión de Vapor a 20°C (mm Hg)	95.2	28.4	9.5	-	6.6	-
Densidad Específica a 20°C	0.8787	0.8669	0.8670	0.8642	0.8802	0.8610
Kow a 20°C (log Kow)	2.13	2.69	3.15	3.20	2.77	3.15
Constante de Henry a 25°C (kPa·m <sup>3</sup> /mol)	0.55	0.67	0.80	0.70	0.50	0.71
Polaridad	No polar	No polar	No polar	No polar	No polar	No polar
Biodegradabilidad.	Aeróbica	Anaeróbica/Aeróbica	Aeróbica	Aeróbica	Aeróbica	Aeróbica
Nivel Máximo Contaminante (MCL) (mg l <sup>-1</sup> )	0,005	1	0,7	10*	10*	10*

Los resultados obtenidos de BTEX, resultado de las muestras de agua subterránea de los diferentes aprovechamientos hidráulicos se compararon con agencias regulatorias internacionales, en la Tabla 12, se mencionan las agencias regulatorias y los límites máximos permisibles para benceno y tolueno.

1. Australian Drinking Water Guidelines (ADWG) (2011).
2. OMS (2001).
3. La US EPA (1994).
4. Norma Mexicana Modificación- NOM-127-SSA1-1994 (2000).

Tabla 12. Límites Máximos Permisibles para BTEX.

LMP para BTEX en agua potable de acuerdo a distintas agencias regulatorias.		
Agencias regulatorias	Parámetros	
	Benceno (mg/L)	Tolueno (mg/L)
ADWG (2011)	0.001	0.025
OMS (2001)	0.01	0.7
US EPA (1994)	0.005	1
MODIFICACIÓN-NOM-127-SSA1-1994(2000)	0.01	0.7

En la Figura 69, se presentan los resultados obtenidos de benceno de cada aprovechamiento hidráulico, parámetro analizado a partir de las muestras de agua subterránea tomadas en campo.

Los valores de benceno oscilaron entre 0.84 y 2.77 mg/L, para agua subterránea, cabe mencionar que todos los aprovechamientos hidráulicos se encuentran por arriba del LMP de acuerdo a las diferentes normativas. A pesar de que todos los pozos se encuentran por arriba de los LMP, cabe establecer que los pozos que presentaron mayor contaminación son el PCI 11, PCI 8, PCI 14 y el PCI 7. La mayor concentración de benceno en estos aprovechamientos esta correlacionada a la ubicación de dichos pozos, están muy cercanos a las fuentes de contaminación (estaciones de PEMEX), al mismo tiempo existe relación la dirección de flujo del agua subterránea.

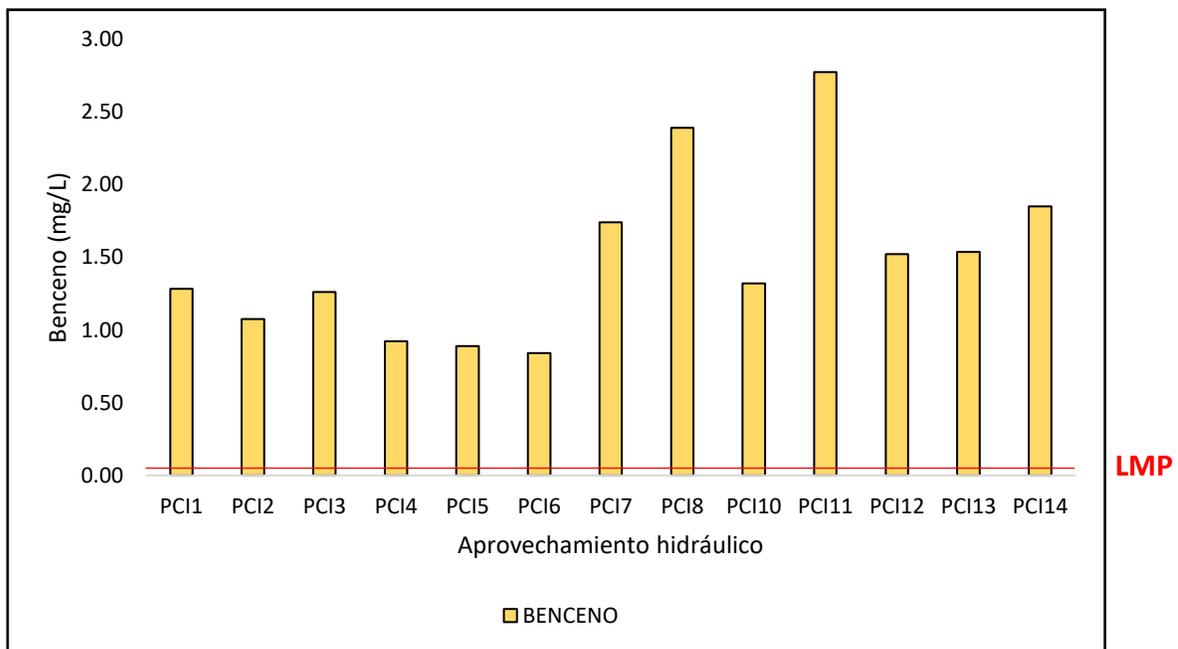
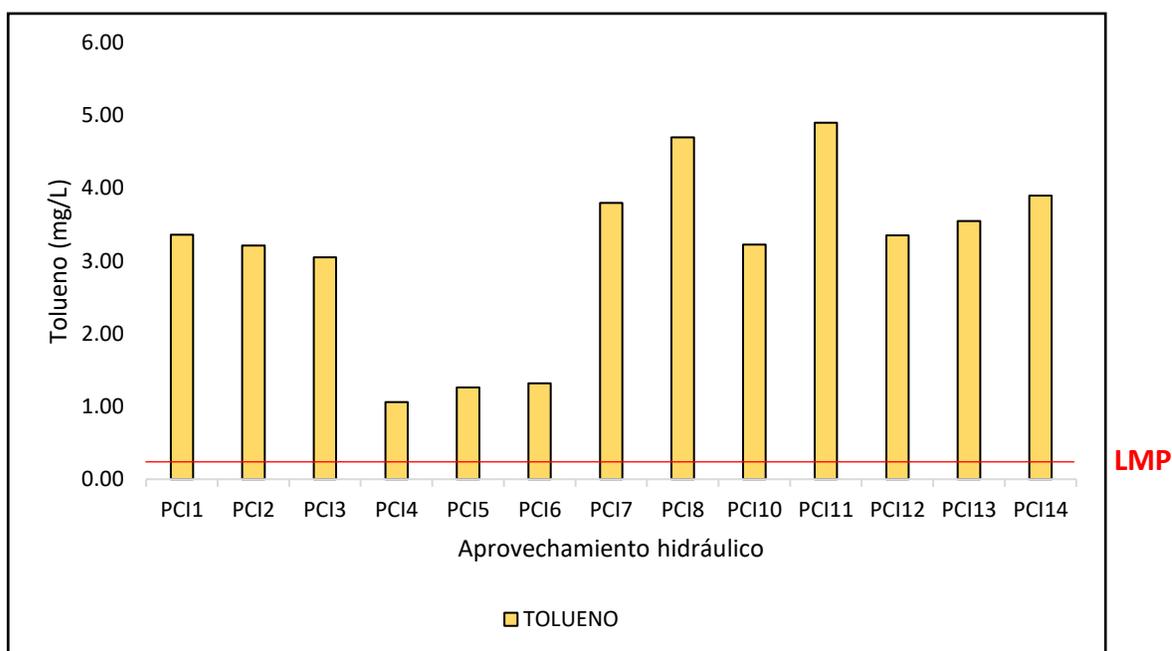


Fig. 69. Resultado de las concentraciones de benceno en las muestras de agua subterránea.

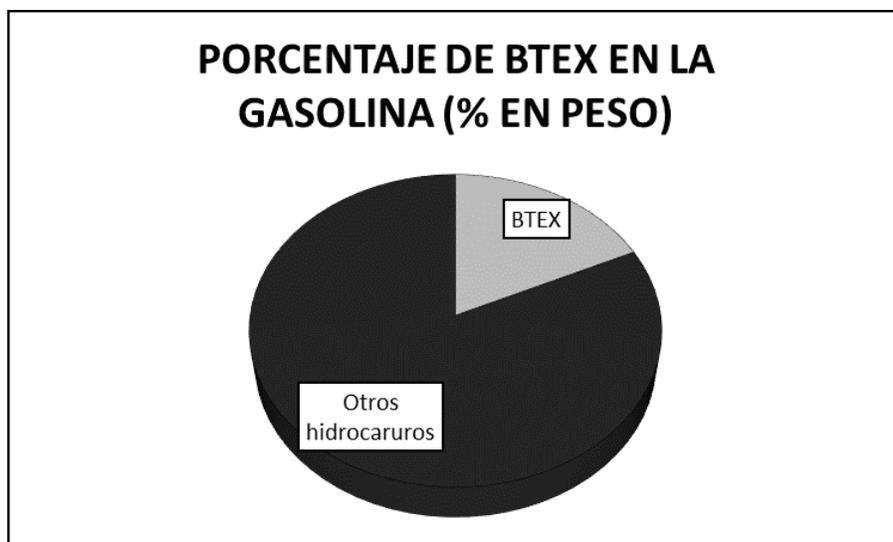
En la Figura 70, se presentan los resultados obtenidos de tolueno de cada aprovechamiento hidráulico, parámetro analizado a partir de las muestras de agua subterránea tomadas en campo.

Los valores de tolueno oscilaron entre 1.06 y 4.90 mg/L, para agua subterránea, cabe mencionar que todos los aprovechamientos hidráulicos se encuentran por arriba del LMP de acuerdo a las diferentes normativas. Al igual que el benceno, las concentraciones de tolueno se encuentran sobrepasando los LMP en todos los aprovechamientos de agua. Podemos observar que la concentración de tolueno es mayor que la de benceno, esto debido a la composición de la gasolina, de cada fracción de benceno siempre llevará una mayor concentración de tolueno.



**Fig. 70.** Resultado de las concentraciones de tolueno en las muestras de agua subterránea.

La gasolina es uno de los contribuyentes más frecuentes de contaminación por BTEX; está compuesta de varios hidrocarburos, cuyos principales componentes son: alcanos, monocicloalcanos, diciticloalcanos, alquilbencenos, indanos, naftalenos y algunos alcoholes aditivos oxigenados. Los BTEX están compuestos por alquilbencenos y representan alrededor del 18 % en peso en la mezcla de la gasolina estándar, el 82 % está conformado por otros hidrocarburos (Figura 71; Fargo, 2015).

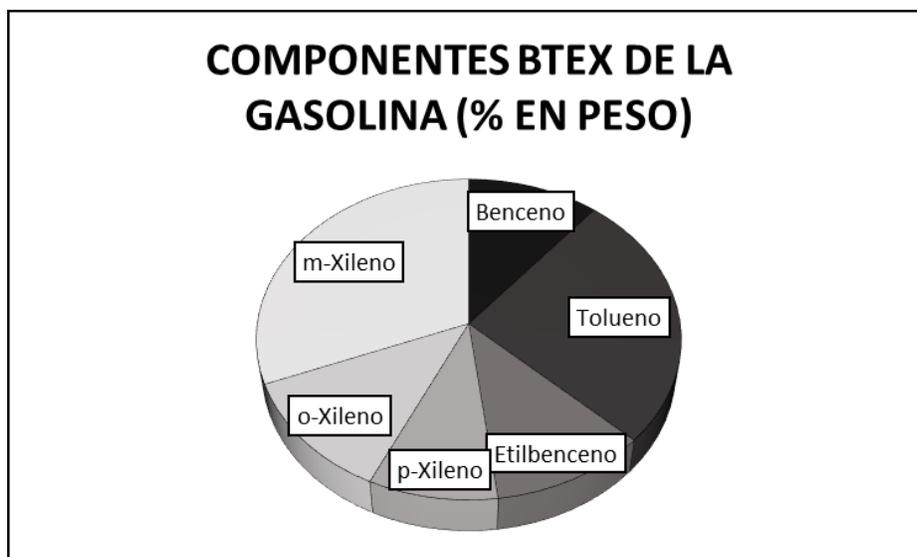


**Fig. 71.** Concentración en por ciento de BTEX en la gasolina.  
**Tomada de:** Fargo, 2015.

Es importante mencionar que la composición de la gasolina puede variar mucho dependiendo del refinador, del proceso de refinamiento y el tiempo de producción. De los diferentes compuestos que estructuran la gasolina, los BTEX es el grupo más grande que se ha relacionado a efectos adversos en la salud. En la Tabla 13, se encuentran las diferentes fracciones de compuestos BTEX presentes en la gasolina producida y vendida en México, en la Figura 72 se encuentran representado gráficamente.

Tabla 13, COV BTEX presentes en gasolinas mexicanas.

Compuesto	% en peso
Benceno	11
Tolueno	26
Etilbenceno	11
m-Xileno	31
p-Xileno	9
o-Xileno	12



**Fig. 72.** Concentración en porcentaje de cada COV BTEX en la gasolina proveniente de PEMEX.  
Tomada de: Fargo, 2015.

La presencia de BTEX en el suelo y en aguas subterráneas y la capacidad de remediación son afectadas por la volatilización, disolución, sorción y la biodegradación por microorganismos; por tanto, la liberación de estos al medio ambiente estará influenciada por sus mecanismos de destino y transporte.

La volatilización afecta las concentraciones iniciales de los BTEX. Cuando ha habido un derrame de gasolina, lo primero que ocurre en el sitio contaminado es que parte de la gasolina se volatiliza dado su alta solubilidad, el bajo peso molecular relativo y la alta presión de vapor (Bedient, 1994). Observando estas características, el benceno es el compuesto que se volatiliza más rápido. Debido a la volatilización la gasolina comienza a disolverse en el agua subterránea (Bedient, 1994) .

Comparado con otros componentes principales de la gasolina, tales como los alifáticos, los BTEX son muy solubles, y la solubilidad de sus diferentes componentes tendrán un gran efecto debido a las concentraciones que aparecerán en el agua subterránea. Cuando la gasolina se disuelve en la fase acuosa, es capaz de moverse con el agua subterránea (Christensen & Elton, 1996).

## - Transporte de los COV BTEX

Los contaminantes en el agua subterránea se mueven primariamente en la dirección horizontal determinada por el gradiente hidráulico. La concentración de los contaminantes disminuye por los procesos de dispersión (molecular e hidrodinámica), filtración, procesos químicos, degradación microbológica, tiempo de salida del contaminante y la distancia de viaje (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, US-EPA, 1985).

La dispersión hidrodinámica afecta a todos los contaminantes por igual, mientras que los procesos químicos y la degradación pueden afectar a algunos contaminantes dependiendo de las diferentes velocidades. Los factores complejos que controlan el movimiento del contaminante en el agua subterránea y el comportamiento resultante de la pluma son difíciles de evaluar, debido a la interacción de muchos factores que afectan la extensión y velocidad del mismo.

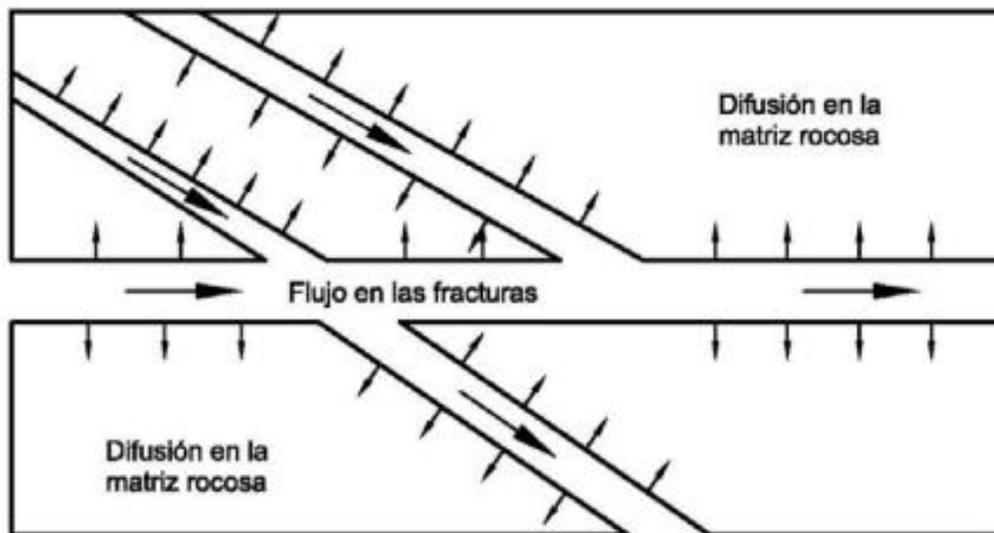
En materiales con bajas conductividades hidráulicas (arcillas compactas y rocas con conductividades menores de 10 a 9 m/s), el transporte difusivo de los contaminantes es mayor que el transporte advectivo. Los contaminantes pueden difundirse en acuitardos naturales o capas de arcillas con bajas conductividades hidráulicas, resultando así en la contaminación del acuífero. La extensión del movimiento dependerá del flujo difusivo, la velocidad del flujo subterráneo en el acuífero y la distancia desde la fuente (Neuzil, 1986).

La densidad de una pluma contaminante puede contribuir en la dirección del transporte del soluto si es suficientemente grande la disolución de las concentraciones, por ejemplo, asumiendo que la densidad del agua en el acuífero es 1, el gradiente horizontal natural es 0.005 y el gradiente vertical natural es 0. Si la densidad de la pluma es igual a la densidad del agua subterránea, esta se moverá horizontalmente con el gradiente hidráulico natural. Si la densidad del agua contaminada es 1.005 (con una concentración aproximada de 7,000 mg/l de sólidos totales disueltos), entonces la fuerza de conducción en la dirección vertical es la misma que la fuerza de conducción en la dirección horizontal. Si el acuífero es isotrópico, entonces el vector resultante de esas dos fuerzas será 45 grados en el acuífero. La pluma contaminante se mueve hacia abajo dentro del acuífero

y puede no ser detectada con un sistema de monitoreo somero instalado bajo la presunción de un flujo horizontal (Palmer & Johnson, 1989 a).

- Transporte a través de medios fracturados

Dado que las rocas fracturadas tienen porosidad primaria y secundaria, los modelos utilizados para describir el transporte de solutos en medios porosos, tales como depósitos aluviales recientes, no son apropiados en medios fracturados (Palmer & Johnson 1989 a). La porosidad primaria es el espacio entre los poros de las rocas, y la porosidad secundaria es el espacio poroso formado como resultado de las fracturas de las rocas. Los mecanismos de transporte en medios no fracturados son la advección y la dispersión, igual que en un medio poroso (Figura 73). Sin embargo, en medios fracturados, los contaminantes son transportados solamente por advección a lo largo de las fracturas. La dispersión en medios fracturados está dada por: (1) mezcla en la intersección de las fracturas, (2) variaciones en los espacios abiertos a todo lo ancho de la fractura, (3) difusión molecular en las microfracturas penetrando las intra-fracturas de los bloques y (4) difusión molecular en las intra-fracturas en bloques de matriz porosa.



**Fig. 73.** Transporte en rocas fracturadas porosas.

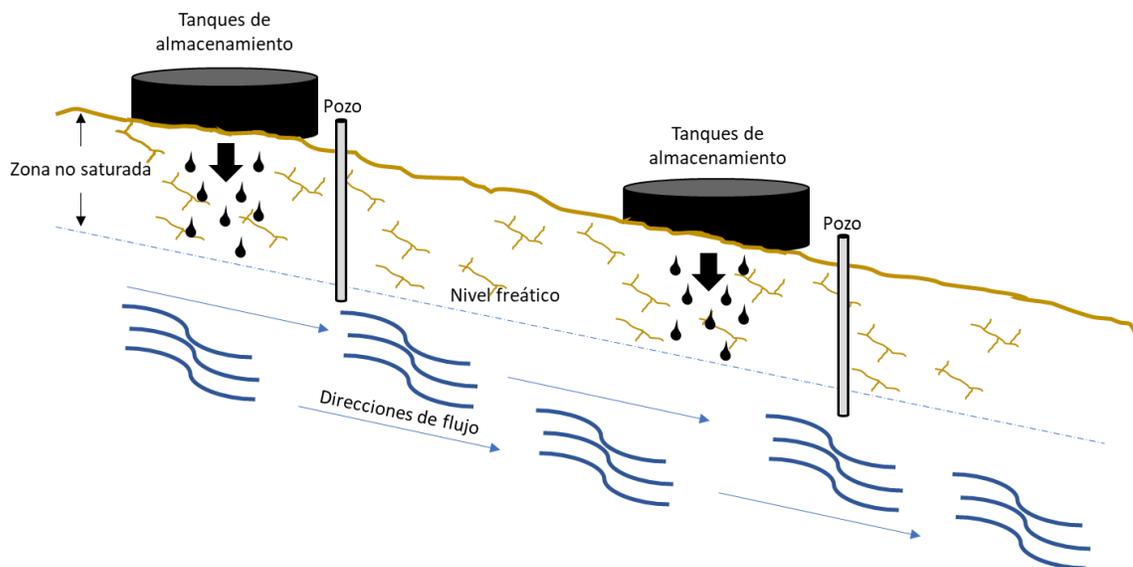
**Tomada de:** Palmer & Johnson, 1989 a.

Para describir el transporte de un contaminante a través de un medio fracturado existen cuatro modelos generales: modelo continuo, modelo de fracturas discretas, modelo híbrido y modelo de canal (Palmer & Johnson, 1989 a).

En un modelo continuo, se ignoran las fracturas individuales y se considera que todo el medio actúa como un medio poroso. Los modelos continuos de porosidad primaria se aplican donde la porosidad del medio es solamente la porosidad de la fractura. Los modelos de porosidad superimpuesta son aplicables al medio en el cual existen la porosidad primaria y secundaria.

Los modelos de fracturas discretas describen el transporte en fracturas individuales. Dada la dificultad de obtener información de cada fractura en el medio, se requieren modelos estocásticos que utilizan información estadística de la distribución de las fracturas, como la orientación y el ancho para describir el flujo y transporte.

En la Figura 74, se encuentra una simulación gráfica de la infiltración del contaminante hacia las aguas subterráneas y posterior movilización del mismo a través del medio altamente fracturado que se encuentra presente en la zona de estudio.



**Fig. 74.** Infiltración del y movilización del contaminante a través de un medio fracturado.  
(Elaboración propia).

# **CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## Capítulo 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

- En el área de estudio se encuentran aflorando sedimentos aluviales, depósitos Terciarios, Cuaternarios y la Formación Méndez, dicha Formación se encuentra altamente fracturada debido a los esfuerzos compresivos ocurridos, la roca lutita de la Formación Méndez al estar altamente fracturada permite una gran conductividad hidráulica, la cual permite la infiltración de los contaminantes hacia el agua subterránea. Las familias de fracturas presentes en el área de estudio se clasifican en un sistema de fracturamiento tipo “ac”, bc” y en menor magnitud fracturas en diagonal de tipo hk0.
- Existen dos tipos de acuíferos en la zona de estudio: gravas (poros) y grietas. El acuífero de gravas se encuentra conformado por los sedimentos del Terciario y Cuaternario, los cuales conforman los conglomerados y terrazas que descansan sobre el río Camacho, su potencial hidrogeológico es medio-alto, el acuífero de grietas se encuentra conformado por las lutitas altamente fracturadas pertenecientes a la Formación Méndez, la matriz de la roca tiene permeabilidad primaria muy baja, sin embargo, las discontinuidades geológico-tectónicas contribuyen al aumento de permeabilidad (permeabilidad secundaria) a través de ellas y su capacidad de conducir el agua depende a su vez de la densidad del fracturamiento y la apertura existente entre fracturas.
- Sobre el lecho del río Camacho se encuentran aflorando la terraza 1, 2 y sedimentos aluviales, compuestas principalmente por gravas, arenas, limos, arcillas cementadas por diferentes material fino, existe presencia orgánica debido a la porosidad y concentración de la humedad, cabe mencionar que las principales fuentes aportadoras de compuestos de hidrocarburo (estaciones de PEMEX) se encuentran sobre la terraza 1.
- Los resultados obtenidos a partir de las diferentes cartas piezométricas mostraron una dirección preferencial del flujo subterráneo de noreste a sureste. Partiendo del pozo con una mayor altura piezométrica con disminución hacia el sureste. Las direcciones de flujo sí coinciden con la orientación de las fracturas, indicado una

dirección del agua subterránea hacia el río Camacho. El gradiente hidráulico (i) calculado varió muy poco, fue de un valor medio de 0.00039 (0.39 %) a 0.00157 (1.57 %), aunado a esto podemos clasificarlo como un acuífero estable.

- A partir de las diferentes determinaciones de parámetros fisicoquímicos fue posible la identificación de los tipos de aguas subterráneas que se tienen presentes en el área de estudio, como resultado se obtuvo la presencia de 2 tipos de aguas: aguas cloruradas sulfatadas cálcicas – magnésicas y aguas bicarbonatadas cálcicas – magnésicas.
- Los resultados de COV BTEX obtenidos por cromatografía de gases FID determinó grandes concentraciones del compuesto benceno (0.84 a 2.77 mg/L) y del tolueno (1.06 a 4.90 mg/L), los cuales se encuentran por arriba de los límites máximos permisibles (LMP) de diferentes normativas tanto nacionales como internacionales. Ambas estaciones de PEMEX manejan producto refinado y destilado, los cuales son gasolinas y diésel, debido a ello la concentración de tolueno resultó mayor que la del benceno, ya que la composición química de dichos productos siempre es mayor la del compuesto tolueno en comparativa que la del compuesto benceno.
- Se confirmó que la planta de rebombeo #5 y la estación de servicio \$4003 de PEMEX se encuentran contaminando e impactando al agua subterránea de la ciudad industrial de Linares, al tratar productos de peso ligero se permite una mayor movilización del contaminante, ya que no se quedan adheridas al sustrato, generando posiblemente una pluma de contaminación, la cual puede ser movilizadada hasta la presa Cerro Prieto, presa que abastece de agua potable a la ciudad de Monterrey y el Área Metropolitana.

## 6.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar monitoreos y muestreos permanentes a cada uno de los aprovechamientos hidráulicos presente en la zona de estudio y a partir de ello realizar las determinaciones necesarias para la identificación y cuantificación de contaminantes para evaluar el impacto ambiental generado, al no existir una normativa como tal para aguas subterráneas se recomienda implementar una norma específica, para así regular los diferentes contaminantes que puedan estar presentes en el agua subterránea.
- Realizar muestreos de suelos a diferentes profundidades para determinar el impacto producido por la infiltración del contaminante a través de los poros y grietas existentes en el macizo rocoso, a partir de dichos muestreos realizar microextracción para la identificación del contaminante.
- Campañas de muestreo para agua superficial en los ríos: Camachito, Hualahuises, Camacho y Pablillo ya que el agua subterránea esta en contacto directo con ellos, de igual forma sería preciso muestrear el agua de la presa Cerro Prieto para comprobar si existe contaminación presente, resultado del transporte del contaminante a través de los diferentes ríos.
- Al tener presencia de compuestos ya refinados, como lo es el diésel y la gasolina se recomienda realizar análisis en agua para la determinación y cuantificación de hidrocarburos totales de petróleo (HTP), esto podría complementar la presencia de BTEX al realizar un estudio más general identificando hidrocarburos no solamente aromáticos sino también alifáticos.
- Se recomienda la implementación y aplicación de sondeos geofísicos para la determinación de la pluma de contaminación producida por los COV BTEX, de esa forma se podría simular una movilización del contaminante con base a la fase (peso) del compuesto.
- La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (modificación año 2000), no cuenta con una normativa para los elementos químicos de riesgo a la salud por ingesta de hidrocarburos, por ende, se recomienda sea revisada para obtener un mejor resultado en sus LMP.

## • BIBLIOGRAFÍA

1. Adams, R., Zavala-Cruz, J. & Morales-García, F. (2008). Concentración residual de hidrocarburos en el suelo del trópico. II: Afectación a la fertilidad y su recuperación. *Interciencia*. 33, 483-48
2. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Benzene. Atlanta: US Public Health Services; 2017. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp3.html>.
3. Ahmed, F., Fakhruddin, A.N.M. 2018. A Review on Environmental Contamination of Petroleum Hydrocarbons and its Biodegradation. *International Journal of Environmental*
4. American Petroleum Institute. Alcohols and Ethers: A Technical Assessment of Their Application as Fuels and Fuel Components, 3<sup>rd</sup> ed., API publication 4251, Washington, DC, 2001.
5. Anderson B.D., Aguilera V.M., (1986): Push faults, a conceptual model for groundwater exploration in the Sierra Madre Oriental Foreland, Mexico. *Zbl. Geol. Paläont. Teil I*, no 9/10, pp. 1149-1160.
6. Anguita, F. (1996). Geología y ciencias de la Tierra: etimología y un poco de historia. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 4(3), 177-180.
7. APHA, (1995). Standard Methods for the Examination for Water and Wastewater. USA: American Public Health Association, Washington, DC 20005, 19th Edition.
8. APHA-AWWA-WPCF, (1989). Métodos de Normalización para análisis de aguas potables y residuales. Ediciones Díaz de Santos, S.A.
9. Aranda, D. F. C. (1984). *Procesos del ciclo hidrológico*. UASLP.
10. Autino, J. C., Romanelli, G. P., & Ruíz, D. (2013). Introducción a la química orgánica. La Plata: Universidad de la Plata.
11. Barboza Gudiño, J.R.; et al. (2010). Late Triassic stratigraphy and facies from northeastern México: Tectonic setting and provenance. *Geosphere*, October 2010, v. 6; No. 5, pp. 621-640.
12. Barton N., Bamford W.E., et al., (1978): Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock*

Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, Abstracts, Vol. 15, no. 6, pp. 319-368.

13. Béjar, M. V. (2004). *Hidrología*. Facultad de Ingeniería, UNAM.
14. Bratton, T., Canh, D. V., Van Que, N., Duc, N. V., Gillespie, P., Hunt, D., ... & Nelson, R. (2006). The nature of naturally fractured reservoirs. *Oilfield Review*, 18(2), 4-23
15. Cabrejo, I. T., Pineda, E. P., Gómez, R., & Castellanos, D. (2010). Metodología para la caracterización petrofísica de yacimientos naturalmente fracturados. *Revista Fuentes*, 8(1).
16. Campa, U.M.F.; Coney, P.J. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distribution in México. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 20, pp. 1040-1051.
17. Catalán J., (1969), *Química del Agua*. Editorial Blumer, España.  
Metalf & Eddy., (1995). *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*. Volumen 1. McGraw-Hill.
18. Cavazos-Arroyo, J., Pérez-Armendáriz, B., & Mauricio-Gutiérrez, A. (2014). Afectaciones y consecuencias de los derrames de hidrocarburos en suelos agrícolas de Acatzingo, Puebla, México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 11(4), 539. <https://doi.org/10.22231/asyd.v11i4.16>
19. CENAPRED (2017). Seminario internacional sobre la gestión integral de los riesgos químicos-tecnológicos. Las emergencias ambientales en México: consecuencias e impactos. Centro Nacional de Prevención de Desastres [en línea]. <http://www.cenapred.gob.mx:8080/SeminarioInternacional2014/ponencias/11/08/2017>.
20. Chereque, M. OW, V., 1989. *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil* Pontificia Universidad Católica del Perú, obra auspiciada por CONCYTEC. Lima, Perú, 223 pp
21. Christensen J.S and Elton J., 1996: *Soil and Groundwater Pollution from BTEX*. *Groundwater Pollution Primer*.
22. *Ciclo Hidrológico* (2011). Sociedad Geográfica de Lima. Lima – Perú. SENAMHI.

23. Claudio Gómez, O. G., (2018). “Desalinización de agua para aplicaciones de potabilización mediante el desarrollo de tecnología solar sustentable”. (Tesis maestría). Centro de investigación en óptica, A. C., Aguascalientes, Ags, México
24. Collazo-Caraballo, M. P. y Montaña-Xavier, J. (2012). Manual de Agua Subterránea: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Montevideo, Uruguay. 121 pp.
25. COMUNIDAD ANDINA. Manual de Estadísticas Ambientales. CAN: Santa Cruz de la Sierra, 2005. p. 31-45.
26. CONAGUA, (2021). Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia
27. Curtin, K. M., Nicoara, G., & Arifin, R. R. (2007). A comprehensive process for linear referencing. URISA Journal, 19(2), 41-50.
28. Custodio E., & Llamas M.R. (1996). Hidrología subterránea. Segunda edición. Omega. Tomo I. Barcelona.
29. Dabrio, M.V. 1971. Cromatografía de gases. Vol. I. Ed. Alhambra, S.A. España. 182pp.
30. Dabrio, M.V. 1971. Cromatografía de gases. Vol. II. Ed. Alhambra, S.A. España. 223pp.
31. De la Fuente Solís 2021
32. De la Garza-González, S.I. (2000): Estudio geológico/hidrogeológico en la región dtricola (LinaresHualahuises) Nuevo León, Mexico. Teas de Licenciatura, Fac. Ciencias de la Tierra, U.A.N.L., 131 PP
33. De León-Gómez H. (1993). Evaluación de las experiencias durante la operación de la Presa Cerro Prieto, Linares NI., México, en la perspectiva de la Ingeniería Geológica e Hidrogeologia. Universidad Técnica de Aachen, Alemania. Tesis doctoral.
34. De León-Gutiérrez, A., (1999). “Investigación sobre terrazas fluviales del cañón Santa Rosa, Iturbide N.L., como base para el establecimiento de una estratigrafía del cuaternario en el noreste de México”. (Tesis de Maestría). FCT/UANL, Linares, Nuevo León, México.

35. Díaz Delgado, C. D., Alberich, M. V. E., & López-Vera, F. (Eds.), (2005). Recursos hídricos: conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica. Piriguazú Ediciones
36. Dickinson, W.R. (2004). Evolution of the Northamerican Cordillera. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2004. v. 32, pp. 13–45 doi: 10.1146/annurev.earth.32.101802.120257.
37. Ecofluidos Ingenieros, S. A., (2012). Estudio de la calidad de fuentes utilizadas para consumo humano y plan de mitigación por contaminación por uso doméstico y agroquímicos en Apurímac y Cusco. Informe Final. OPS/OMS. Lima–Perú.
38. Eguiluz De A. S.; Aranda, G.M.; Marrett, R. (2000). Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. LIII, pp. 1-26.
39. Escobar, C. N., (2003), Análisis de compuestos orgánicos volátiles en agua potable por cromatografía de gases., Universidad de los Andes, Bogota, D.C
40. Estrella, S. (2012). ANÁLISIS DE HIDROCARBUROS DE PETRÓLEO EN AGUA MEDIANTE CROMATOGRFÍA DE GASES. QUITO: DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCION.
41. Galván-Mancilla, S.M. (1996): Cartografía hidrogeológica de la terraza baja entre Hualahuises y Linares, N.L. Tesis de Licenciatura, FCT/UANL, 63 pp.
42. García González, T. S., (2017): Análisis hidrogeológico e hidrogeoquímico del campus Ciudad Universitaria de la UANL; como aporte para el manejo sostenible del agua subterránea (Tesis de Maestría). FIC/UANL, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.
43. García Villanueva, L. A., & Fernández-Villagómez, G. (2014). Determinación del perfil de benceno y de hidrocarburos de fracción ligera en el suelo del pasivo ambiental de la ex-refinería “18 de marzo”, Ciudad De México. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 30(2), 201–211.
44. Gary, J. &. (1980). Refino de petróleo. New York: Reverté S.A.
45. Gavilanez, T. (2013). Determinación de la biodiversidad bacteriana presente en suelos contaminados con hidrocarburos para uso potencial en biorremediación. Ambato-Ecuador.

46. Gobierno del Estado (GOB), (2019), Información Estadística Climatológica, Estación Meteorológica, Camacho (19035)
47. Goldhammer, R.K. (1999). Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast of México, in Bartolini, C., Wilson, J.L., and Lawton, T.F., eds., Mesozoic Sedimentary and Tectonic History of North-Central México. Boulder, Colorado, Geological Society of North America Special Paper 340, p. 1-58.
48. Goldhammer, R.K.; Johnson, C.A. (2001). Middle Jurassic-Upper Cretaceous Paleogeographic evolution and sequence-stratigraphic framework of the northwest Gulf of México rim, in: Bartolini, C.; Buffler, R. T.; Cantú-Chapa, A. eds. The western Gulf of México Basin: Tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems. American Association of Petroleum Geologists Memoir 75, pp. 45-81.
49. Gómez-Duarte, O. G. (2018). Contaminación del agua en países de bajos y medianos recursos, un problema de salud pública. Revista Facultad de Medicina, 66(1), 7–8. <https://doi.org/10.15446/revfacmed.v66n1.70775>
50. González-Elizondo M. (1996). Análisis de la vegetación secundaria de Linares, N.L., México. Tesis de Maestría Fac. Ciencias Forestales, U.A.N.L., 103 pp.
51. Groundwater. Freeze, Allan, Cherry, John. Prentice hall. 1ra Edición. 1979
52. Guntuzweiny, J.S. 2000. Handbook of chromatography, general data and principles. Press Ed, USA. p. 1-25
53. Gutiérrez Caiza, C. (2014). Hidrología básica y aplicada.
54. Hatzioannidis I., Voutsas E.C., Lois E. y Tassios D.P. Measurement and Prediction of Reid Vapor Pressure of Gasoline in the Presence of Additives. J. Chem. Eng. Data, volumen 43, 1998:386-392.
55. Hinwodd AL, Berko HN, Farrar D, Galbally IE, Weeks IA. Volatile Organic Compounds in selected micro-environments. Chemosphere 2006; 63:421-9.
56. INEGI. Linares estado de Nuevo León : cuaderno estadístico municipal 2000. 2001.
57. Ingeniería Energética General. (2013). Grados API y Gravedad específica de los Hidrocarburo. Energianow.

58. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)., (2009).  
Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos.  
Cadereyta Jiménez, Nuevo León. 19009.
59. Iriondo, M. (2007). *Introducción a la Geología*. Editorial Brujas.
60. Jennings, W. 1987. *Analytical Gas Chromatography*. Academic Press, Inc.  
Canada, Japan, USA. 259pp.
61. Jiménez, D. L. (2006). Estudio de impacto ambiental generado por un derrame de  
hidrocarburos sobre una zona estuarina, aledaña al terminal de ecopetrol en  
Tumaco. (tesis de pregrado). Ingeniería Ambiental Sanitaria. Universidad de la  
Salle. Bogotá, Colombia.
62. King, E.R. (1939). Geological reconnaissance in northern Sierra Madre  
Occidental of México. *Geological Society of America Bulletin*, v. 50, pp. 1625-1722.
63. Liliana Lizárraga. (2003). Análisis y evaluación del agua subterránea del área del  
tiradero municipal y la Petaca, Linares, N. L. México. Facultad de Ciencias de la  
Tierra, UANL. Linares, Nuevo León, México.
64. Logeshwaran, P., Megharaj, M., Chadalavada, S., Bowman, M., & Naidu, R.  
(2018). Petroleum hydrocarbons (PH) in groundwater aquifers: An overview of  
environmental fate, toxicity, microbial degradation and risk-based remediation  
approaches. *Environmental Technology and Innovation*, 10, 175–193.  
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.02.001>
65. López-Doncel, F. (1990): Mapeo geológico en el área de Puente de Dios al norte  
de Galeana N.L. y desarrollo facial de las Formaciones Aurora, Cuesta del Cura y  
Agua Nueva (Aibiano-Turoniano) en las regiones de Galeana e Iturbide, N.L. Teas  
de Licenciatura, Fac. Ciencias de la Tierra U.A.N.L., 113 PP
66. López-Ramos E. (1980): *Geología de México*, Tomo II. 2a . éd., S.E.P., 454 pp.
67. Mackey, D. Cherry, J. (1989). Groundwater contamination: pump and treat  
remediation. *Environmental Sci Technology*. V.23.
68. Martínez-Quiroga, G. E., (2018). “Caracterización geológica del Río Santa  
Catarina como base para la elaboración de estudios ambientales de  
contaminación y abastecimiento de agua potable para el área metropolitana de  
monterrey (AMM)”. (Tesis de Maestría). FIC/UANL, Nuevo León, México.

69. Mendelssohn, I. A., Andersen, G.L., Baltz, D., Caffey, R., Carman, K., Fleeger, J, Joye, S. B., Lin, Q., Maltby, E., Overton, E. B. & Rozas, L. (2012). Oil Impacts on Coastal Wetlands: Implications for the Mississippi River Delta Ecosystem after the Deepwater Horizon Oil Spill. *Bioscience*. 62, 562-574.
70. Michalzik, D. (1988). Trias bis tiefste Unter-Kreide der nordöstlichen Sierra Madre Oriental, México: Fazielle Entwicklung eines passiven Kontinentalrandes: Darmstadt, Deutschland, Technischen Hochschule Darmstadt, Tesis Doctoral, 247 p.
71. Montanez, Aleyda et. al., (2009). Determinación de compuestos aromáticos en agua potable Mediante screening de muestras y cromatografía líquida con detección UV. *Rev. Fac. Ing. UCV [online].*, vol.24, n.4, pp. 72-81. ISSN 0798-4065.
72. Navar-Chaidez J., Synnott T J (2000): Soil infiltration and land use in Linares, N.L., México. *TERRA* vol. 18, no. 3, pp. 255-262
73. Nelson G. (2001). A multi-Dimensional System of Fracture Abundance Measures. Geological Society of America Annual Meeting. Reno, Nevada, November 2001
74. Odling N.E., Roden J.E. (1997): Contaminant transport in fractured rocks with significant matrix permeability, using natural fracture geometries. *Journal of Contaminant Hydrology*, no. 27, pp. 263-283.
75. Ortega-Guerrero, M. A. (2009). Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 26(1), 143-161.
76. Padilla Francisco (2012), *Geología Aplicada, Ingeniería Geológica*, Universidad de A Coruña.
77. Padilla y Sánchez R.J. (1978): Bosquejo geológico-estructural de la Sierra Madre Oriental en el área LinaresGaleana-San Roberto, Estado de Nuevo León. *Revista del Instituto de Geología, U.NAM.*, vol. 2, no. 1, pp. 45-54.
78. Padilla y Sánchez R.J. (1985): Las estructuras de la Curvatura de Monterrey, Estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí. UNAM, Instituto de Geología, *Revista* vol. 6, no. 1, pp. 1-20

79. PAICYT CT 1202-05, Caracterización ambiental originada por la contaminación en el agua subterránea en la ciudad industrial de Linares, Nuevo León (2006).
80. PAICYT CT 783-02, Evaluación del impacto originado por derrame de residuos sólidos y líquidos en el agua subterránea de la ciudad industrial de Linares, México (2003).
81. Palazzi, P., Mezzache, S., Bourokba, N., Hardy, E. M., Schritz, A., Bastien, P., ... Appenzeller, B. M. R. (2018). Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in women living in the Chinese cities of BaoDing and Dalian revealed by hair analysis. *Environment International*, 121(November), 1341–1354. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.10.056>
82. Patel V, J. S. (2012). Naphthalene degradation by bacterial consortium (DV-AL) developed from Alang-Sosiya ship breaking yard, Gujarat, India. NCBI, 107- 122
83. Pérez, G. & Ramírez J.J., (2008). Fundamentos de limnología neotropical. 2ª edición. Editorial Universidad de Antioquia. 403pp.
84. PROFEPA (2016). Boletín de prensa BP/598-16. PROFEPA impulsa la preparación y respuesta a emergencia químicas en el país. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente [en línea]. <http://www.gob.mx/profepa/prensa/profepa-impulsa-la-preparacion-y-respuesta-a-emergencia-quimicas-en-el-pais> 19/05/2017.
85. PROFEPA (2016). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Subprocuraduría de Inspección Industrial. [en línea]. <http://www.gob.mx/profepa/prensa/profepa-impulsa-la-preparacion-y-respuesta-a-emergencia-quimicas-en-el-pais> 19/04/2016.
86. Quintero Legorreta O. (2002), Análisis estructural de fallas potencialmente activas, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, LV (1), 1-11 pp.
87. Ruiz, M. (1990): Zur Gliederung Verbreitung und ökologischen Bewertung der Böden im Gebiet von Linares, N.L., Göttingen Beitr. Z. Land U. Forstw. Tropen and Suptropen, 56:184 pp., Göttingen, Alemania.

88. Salvador, L., & Fernandez. (2012). Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos pesados y caracterización de comunidades microbianas implicadas. Barcelona: Universidad de Barcelona.
89. Sánchez-Sánchez, J. A., Álvarez-Legorreta, T., Pacheco-Ávila, J. G., González-Herrera, R. A., & Carrillo-Briebiezca, L. (2015). Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del sur del Estado de Quintana Roo, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 32(1), 62-76.
90. Sandoval Herazo, E. J., & Lizardi Jiménez, M. A. (2020). Hydrocarbons: pollution at the Mexican Caribbean. *Revista Digital Universitaria*, 20(1). <https://doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2019.v20n1.a5>
91. Sawyer N. C., McCarty L. P., Parkin F. G., (2000). *Química para ingenieros ambientales*. Colombia: Emma Aritza H.
92. *Sciences & Natural Resources*, 11(3), 1-7. <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2018.11.555811>
93. SEMARNAT, (2015). *N Engl J Med*, 14372, 1349-1358.
94. SEMARNAT. (2005). NOM-138-SEMARNAT / SS-2003 Normas Oficiales Mexicanas. 1–21.
95. Servicio Geológico Mexicano (2016) ¿Qué es la Geología?.
96. Shafy, A., & Mansour, M. (2015). A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egypt. J. Pet*, 23-25
97. Silva Hernández, Francisca. El agua como Derecho Humano. *Revista Inclusiones Vol: 7 num Especial (2020): 01-08*
98. Spier, C., Stringfellow, W. T., Hazen, T. & Conrad, M. (2013). Distribution of hydrocarbons released during the 2010 MC252 oil spill in deep offshore waters. *Environmental pollution*. 173, 224-230.
99. Estrella, S. (2012).
99. Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., Tasa, D., & Cientficias, A. T., (2005). *Ciencias de la Tierra*. Madrid: Pearson Educación.
100. Thion, C., Beguiristain, T., & Leyval, C. (2013). Inoculation of PAH-degrading strains of *Fusarium solani* and *Arthrobacter oxydans* in rhizospheric

sand and soil microcosms: microbial interactions and PAH dissipation. PUBMED, 7-9

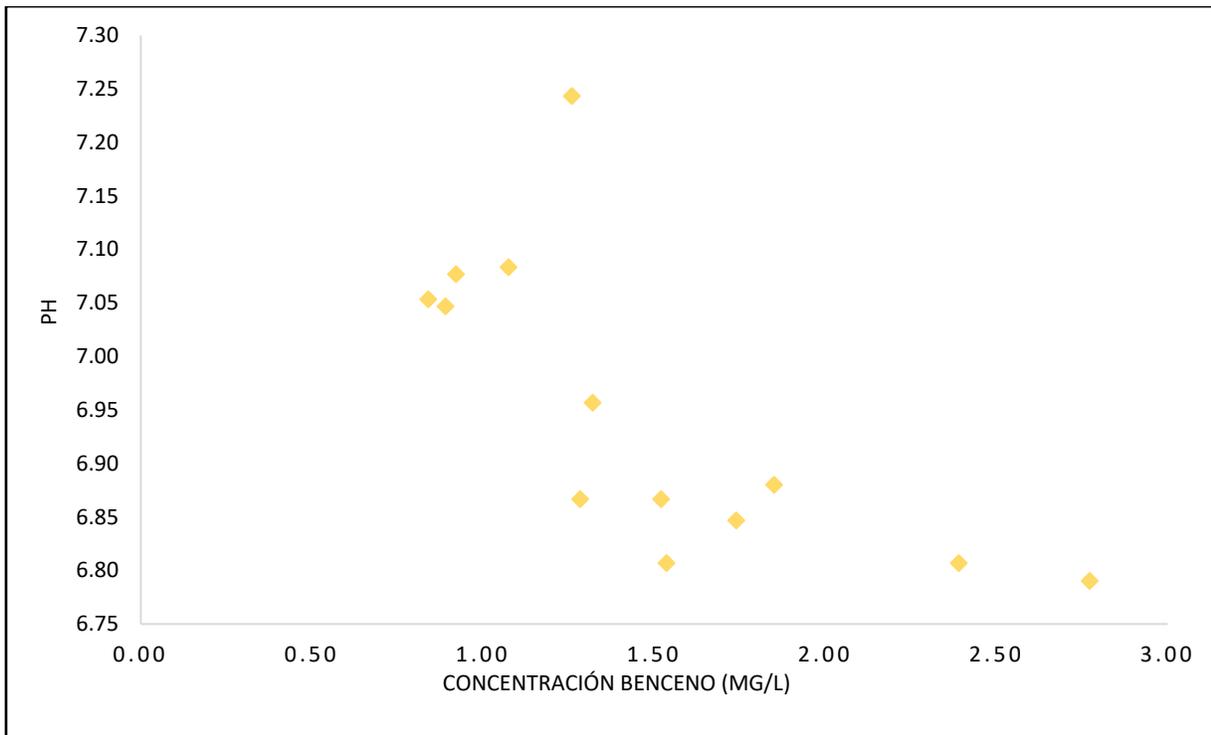
101. Torres, D. (2009). Papel de los microorganismos en la degradación de compuestos tóxicos. España: Ecosistemas.
102. Torres, R., et al. (1999). A Permo-Triassic continental arc in eastern México: Tectonic implications for reconstruction of southern North America, in: Bartolini, C.; Wilson, J. L.; Lawton, T. F. eds. Mesozoic Sedimentary and Tectonic History of North-Central México. Boulder, Colorado, Geological Society of North America Special Paper 340, pp. 1-58.
103. Twiss R. J., Moores E.M. (1992). Structural Geology. W.H. Freeman and Company.
104. U.S. EPA., (2013). Mn and Btex Reference Value Arrays (Final Reports). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-12/047F.
105. Viniegra, F. (1966). Paleogeografía y tectónica del Mesozoico en la provincia de la Sierra Madre y Macizo de Teziutlan. Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros. v. 18, pp. 145- 171.
106. Werner J. (1996). Introducción a la Hidrogeología. Primera edición. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, NL
107. Wilson, H.W. & M.S. Klee. 1997. Analysis of sulfur and phosphorus compounds with a flame photometric detector on the Agilent 6890 Series Gas Chromatograph. Innovating the HP way Manual. p.1-4
108. Zamora, J. R., (2009). Parámetros fisicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio, pH, conductividad y temperatura del agua potable analizados en conjunto con las Asociaciones Administradoras del Acueducto, (ASADAS), de cada distrito de Grecia, cantón de Alajuela, noviembre. Pensamiento Actual, 9(12), 125-134
109. Zhang, Y., Zhang, L., Huang, Z., Li, Y., Li, J., Wu, N., ... Niu, Z. (2019). Pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in drinking water of China: Composition, distribution and influencing factors. Ecotoxicology and Environmental Safety, 177(November 2018), 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.03.119>

110. Fargo, C., 2015: The Biodegradation potencial of methanol, benzene and m-xylene in a saturated subsurface environment, Virginia Tech. V.20, 30-39

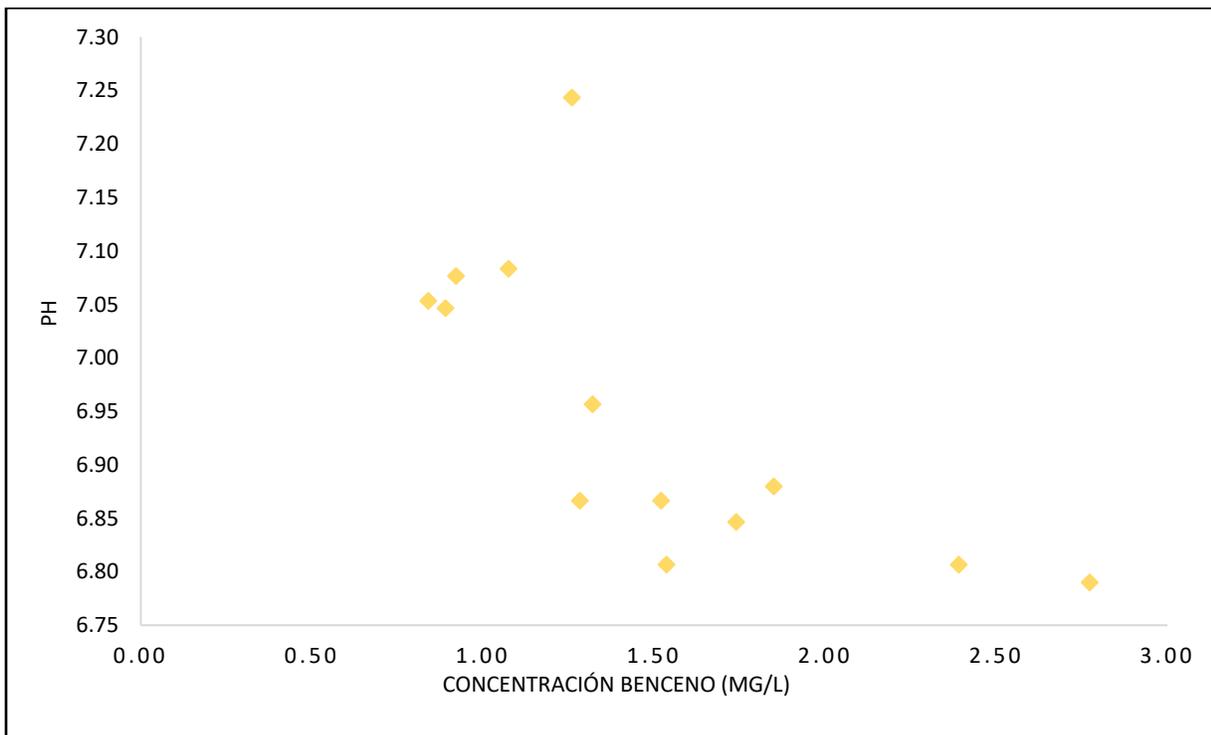
# ANEXOS

Parámetros fisicoquímicos vs benceno.

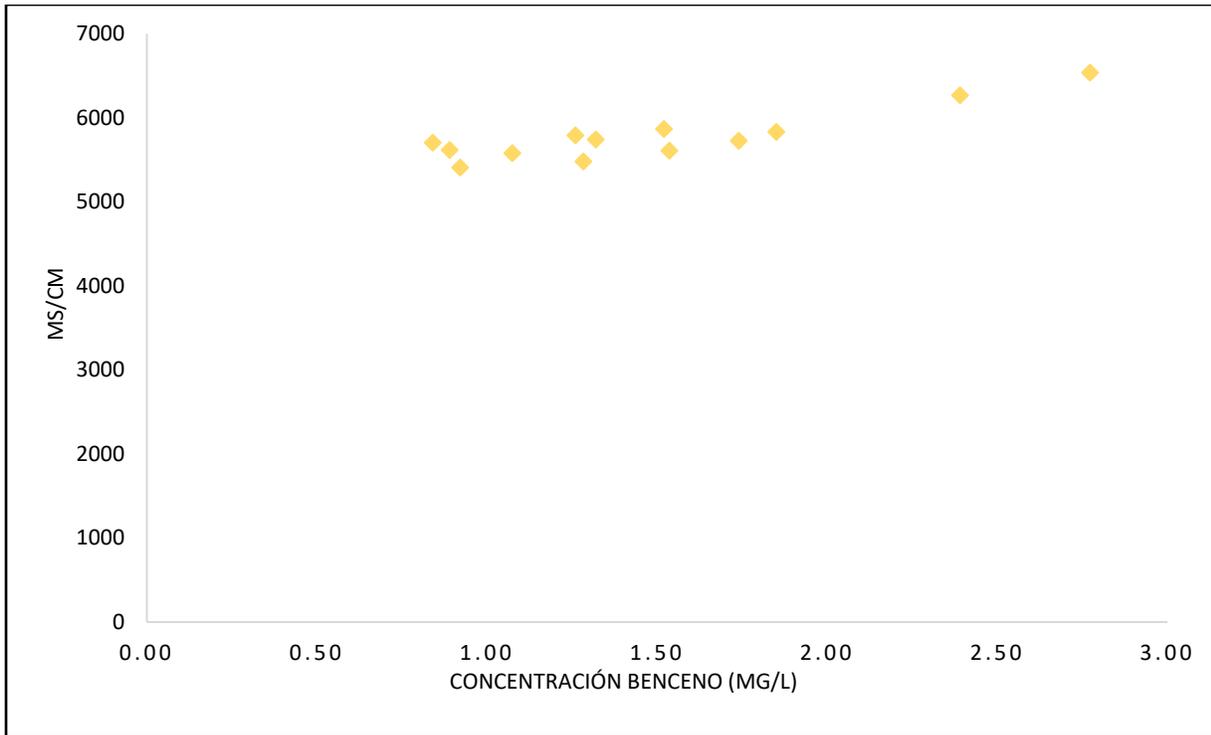
pH vs benceno



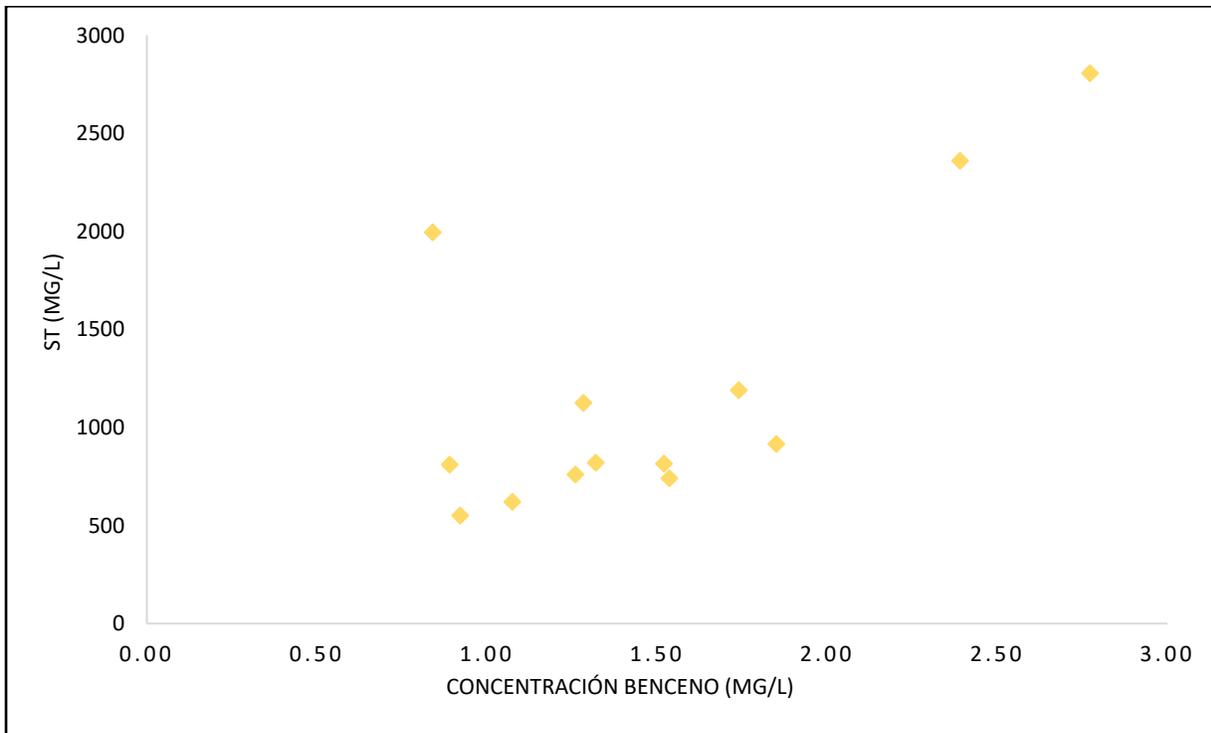
Temperatura vs benceno



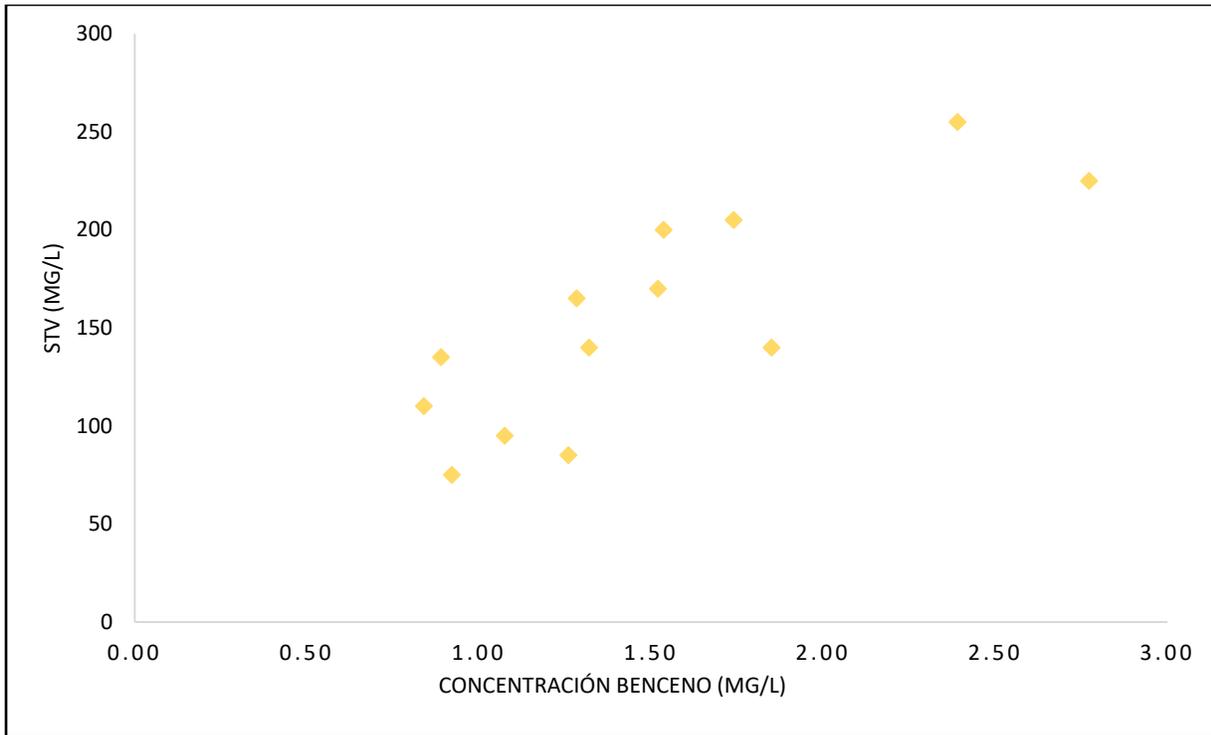
### Conductividad vs benceno



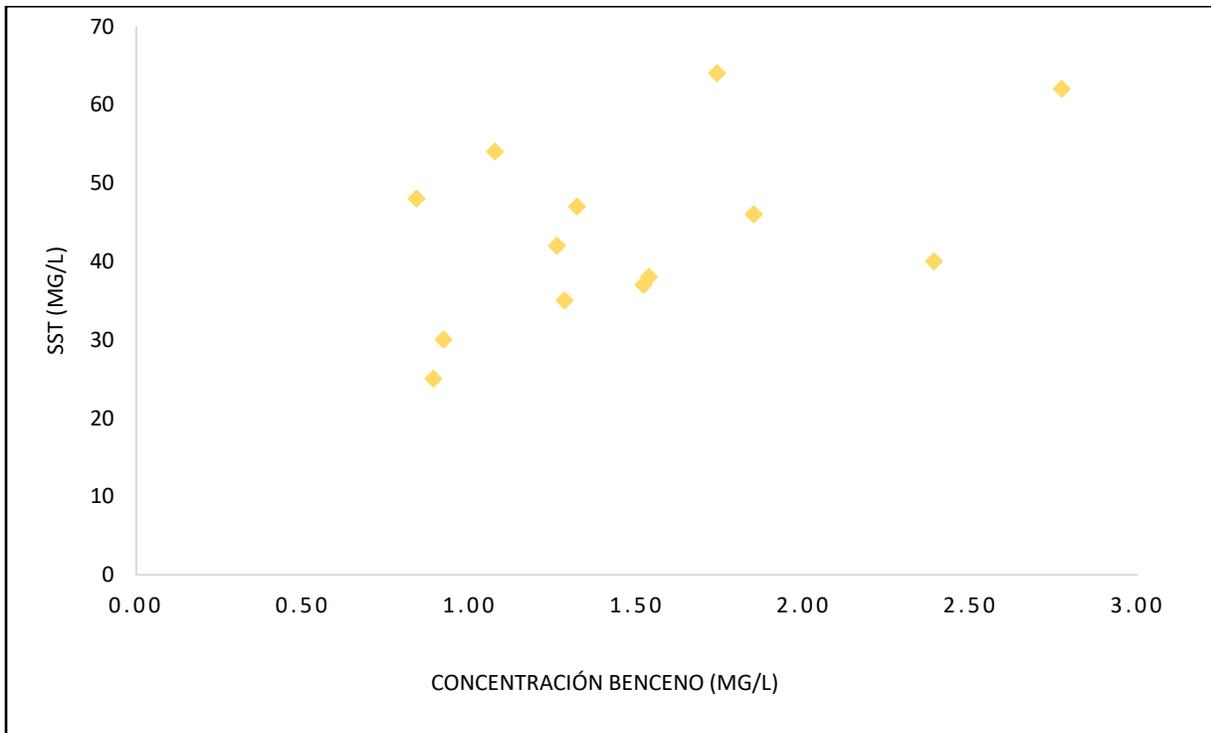
### Sólidos Totales vs benceno



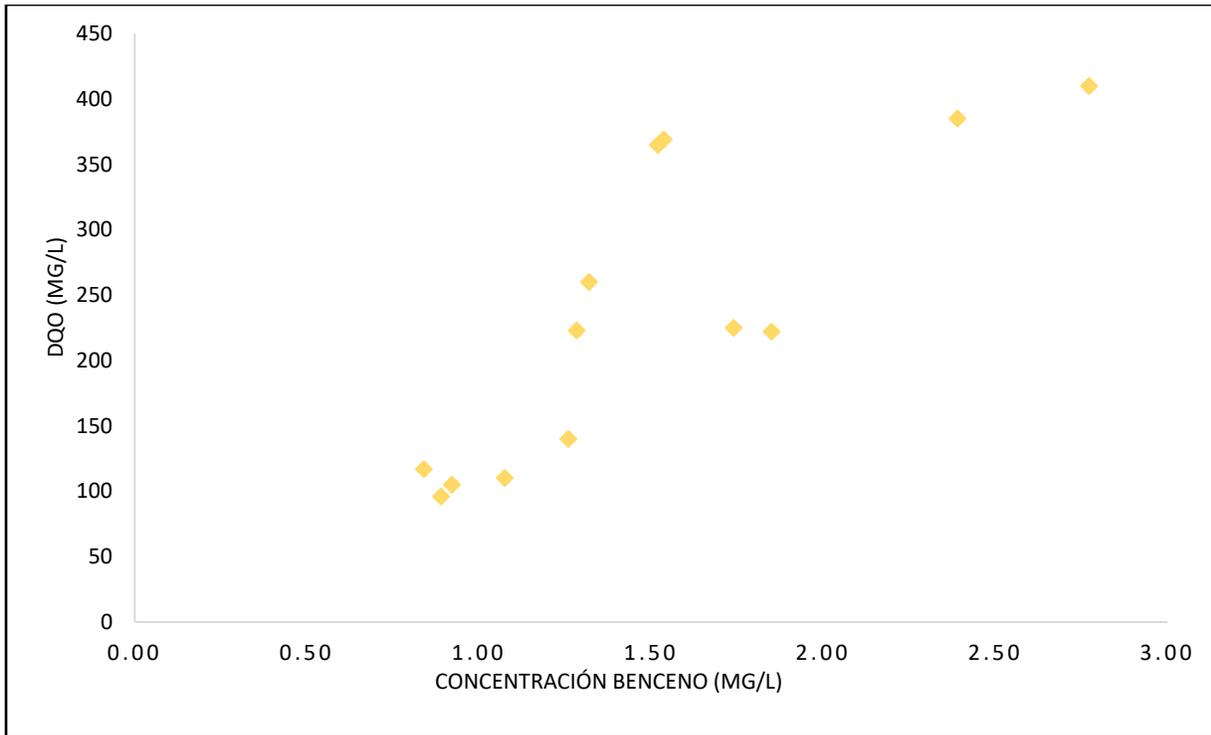
### Sólidos Totales Volátiles vs benceno



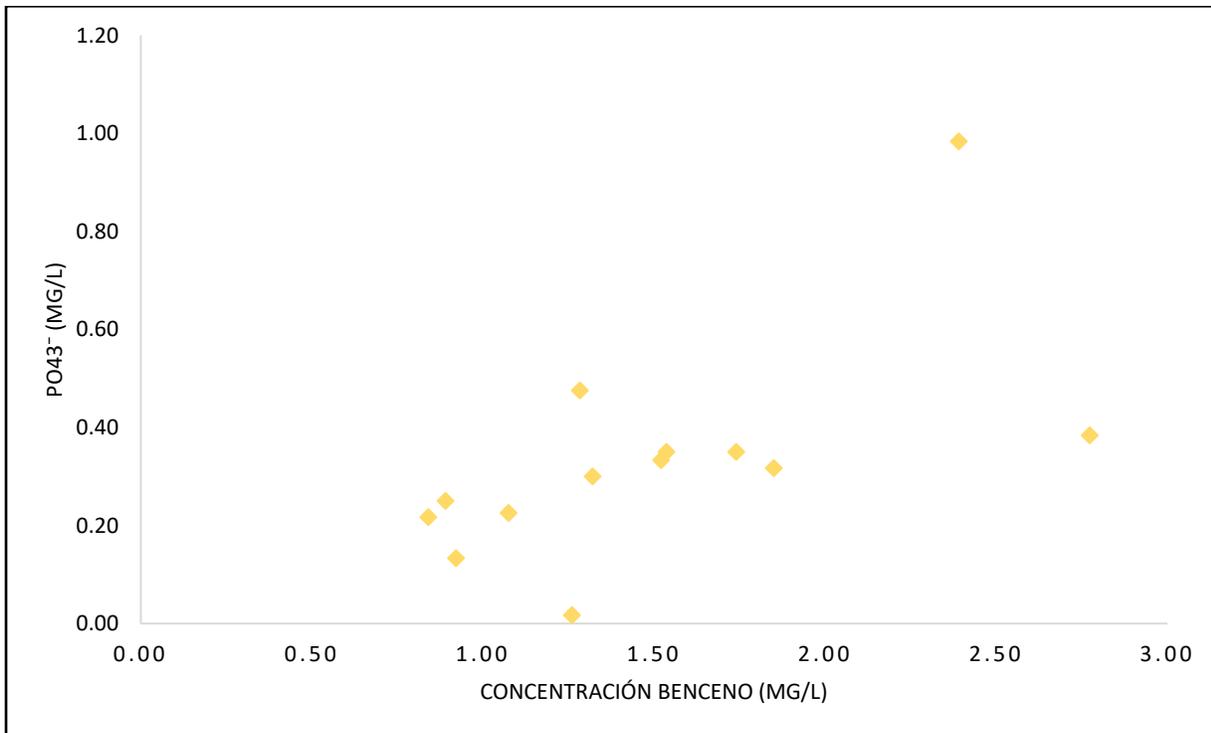
### Sólidos Suspendidos Totales vs benceno



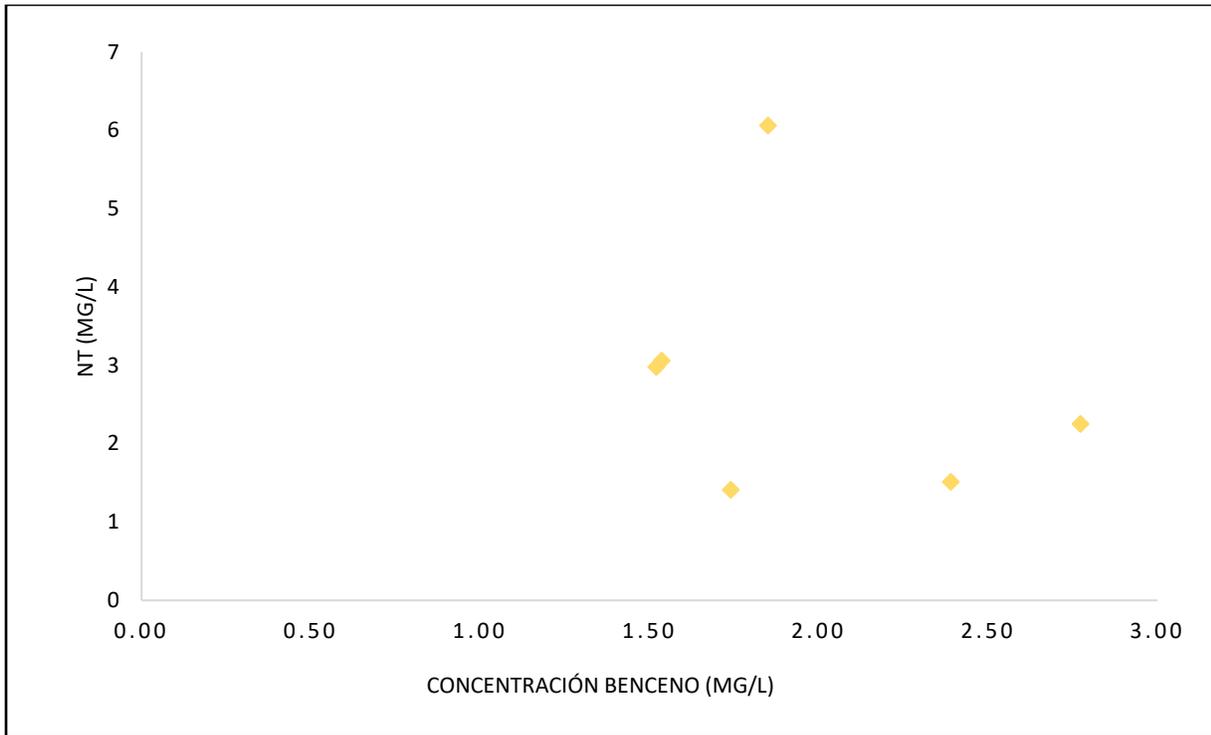
### DQO vs benceno



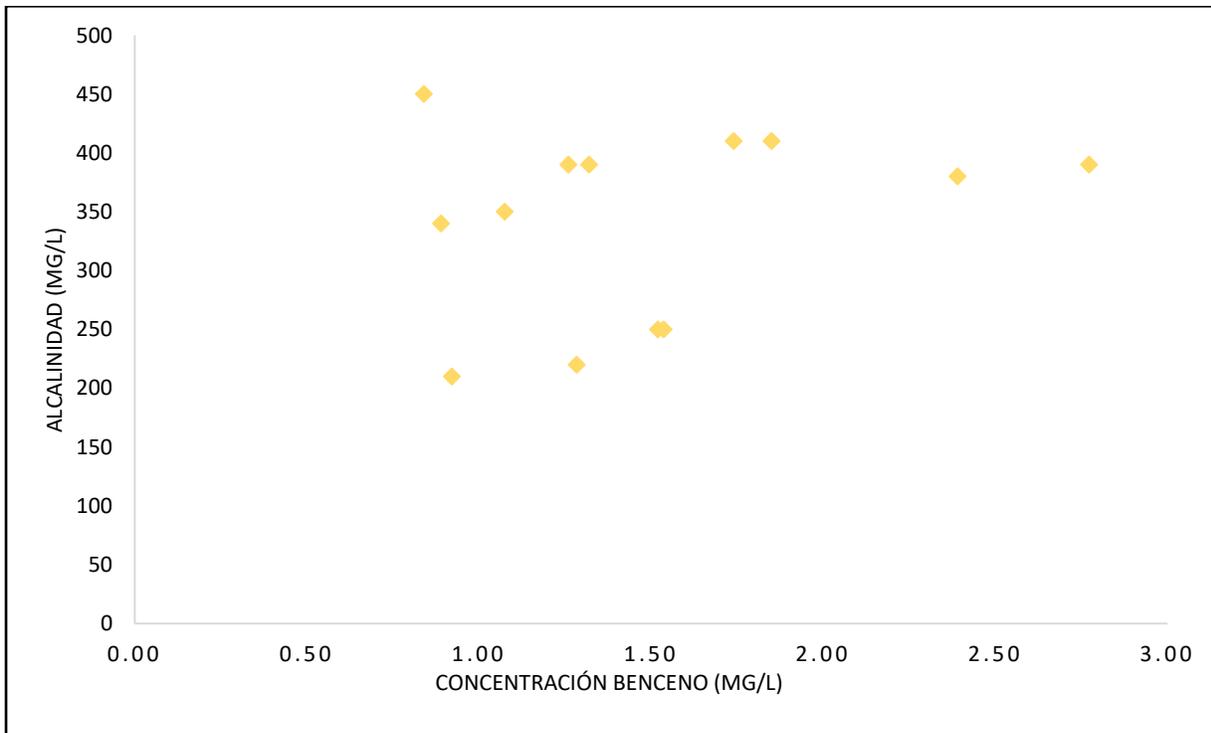
### Fosfatos vs benceno



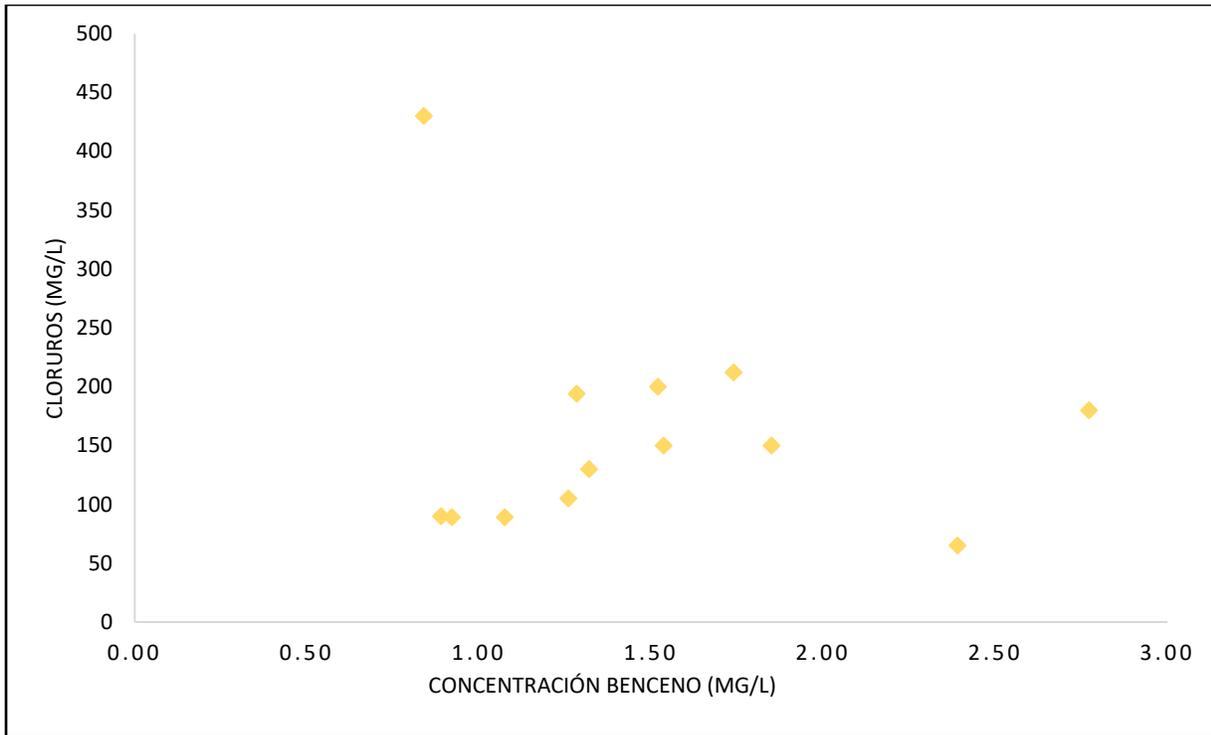
### Nitrógeno Total vs benceno



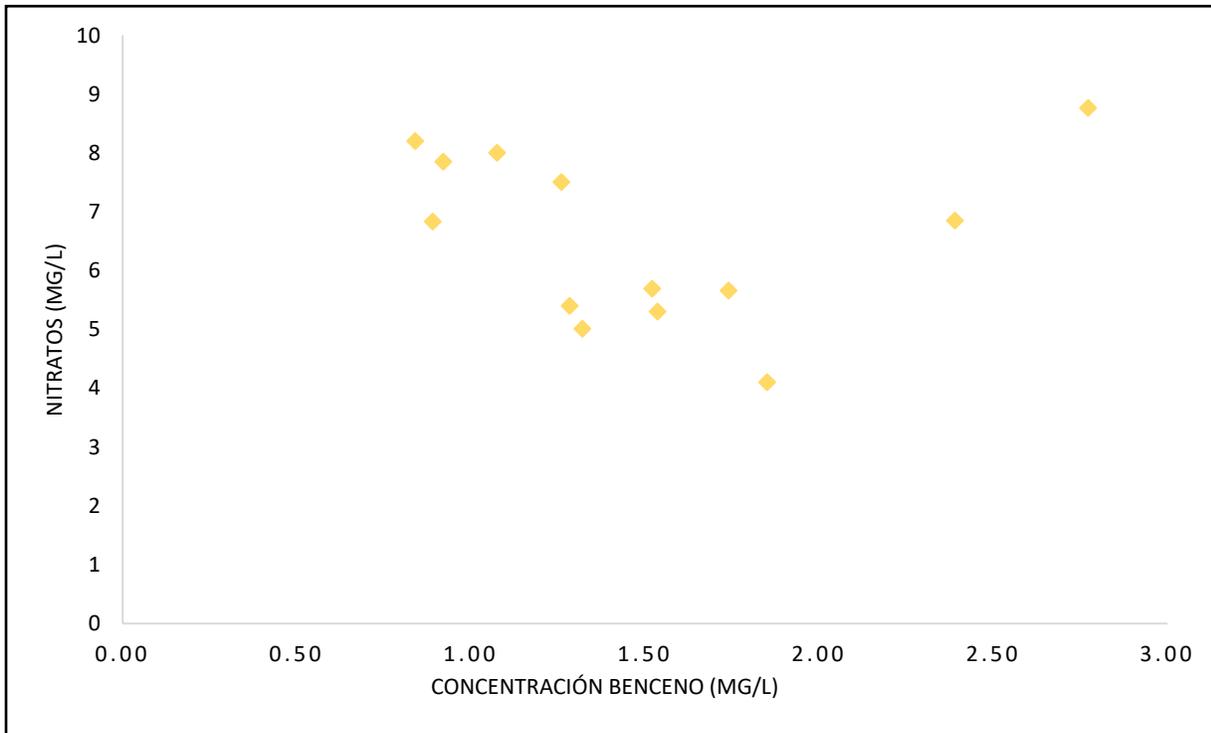
### Alcalinidad vs benceno



### Cloruros vs benceno



### Nitratos vs benceno



## Sulfatos vs benceno

