

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



**“EVALUACIÓN DE LA PRESENCIA DE CONTAMINANTES AMBIENTALES EN
EL RÍO SAN JUAN: CASO DE ESTUDIO REFINERÍA “HÉCTOR R. LARA
SOSA”**

TESIS

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

PRESENTA

ING. ANA MARISSA DE LA FUENTE SOLÍS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L.

ABRIL, 2021



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



TESIS

**EVALUACIÓN DE LA PRESENCIA DE CONTAMINANTES AMBIENTALES EN
EL RÍO SAN JUAN: CASO DE ESTUDIO REFINERÍA "HÉCTOR R. LARA
SOSA"**

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

PRESENTA

ING. ANA MARISSA DE LA FUENTE SOLÍS

Vo. Bo.

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



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



TESIS

**EVALUACIÓN DE LA PRESENCIA DE CONTAMINANTES AMBIENTALES EN
EL RÍO SAN JUAN: CASO DE ESTUDIO REFINERÍA “HÉCTOR R. LARA
SOSA”**

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

PRESENTA

ING. ANA MARISSA DE LA FUENTE SOLÍS

Vo. Bo.

Comité de Revisión de Tesis

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

**Dra. Fabiola Doracely Yépez Rincón
Co-Director de Tesis**

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

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L.

ABRIL, 2021



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

2021/04/09

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es "EVALUACIÓN DE LA PRESENCIA DE CONTAMINANTES AMBIENTALES EN EL RÍO SAN JUAN: CASO DE ESTUDIO REFINERÍA "HÉCTOR R. LARA SOSA"", que presenta la ING. ANA MARISSA DE LA FUENTE SOLÍS, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRA EN CIENCIAS, del programa MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento CUENTA con la calidad y nivel CIENTÍFICO, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea APROBADO.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

DR. HÉCTOR DE LEÓN GÓMEZ

Evaluador



Av. Universidad S/N Col. Universitaria Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
Tels. (81) 1404400 ext. 4448, 8329 4000 ext. 7216, 7234
www.ingenieria@uanl.mx

FECHA: 2021/ABR/15

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es "EVALUACIÓN DE LA PRESENCIA DE CONTAMINANTES AMBIENTALES EN EL RÍO SAN JUAN: CASO DE ESTUDIO REFINERÍA "HÉCTOR R. LARA SOSA"", que presenta la ING. ANA MARISSA DE LA FUENTE SOLÍS, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRA EN CIENCIAS, del programa MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento CUENTA con la calidad y nivel CIENTÍFICO, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea APROBADO.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,



DRÁ. FABIOLA D. YÉPEZ RINCÓN
Evaluador Evaluador



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

FECHA: 2021/04/13

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es "EVALUACIÓN DE LA PRESENCIA DE CONTAMINANTES AMBIENTALES EN EL RÍO SAN JUAN: CASO DE ESTUDIO REFINERÍA "HÉCTOR R. LARA SOSA"", que presenta la ING. ANA MARISSA DE LA FUENTE SOLÍS, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRA EN CIENCIAS, del programa MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento CUENTA con la calidad y nivel CIENTÍFICO, adecuados para su defensa, por lo que dictaminó que este trabajo sea APROBADO.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

Dr. Arquímedes Cruz López

Evaluador



**Evaluación de la presencia de contaminantes ambientales en el río San
Juan: caso de estudio refinería “Héctor R. Lara Sosa”**

Aprobación de la tesis

DR. HÉCTOR DE LEÓN GÓMEZ

PRESIDENTE

DR. ARQUÍMEDES CRUZ LÓPEZ

SECRETARIO

DRA. FABIOLA DORACELY YÉPEZ RINCÓN

VOCAL

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

DEDICATORIA

A Dios, a mi familia y a mis amigos.

En especial a mis padres, hermanos y mi sobrina.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios, por siempre guiarme.

A mis padres Oscar Luis y Norma Delia por siempre motivarme a cumplir mis metas y sueños. En especial a mi madre Norma Delia Solís C., por ser mi inspiración, motivación y mi héroe. Te agradezco todo lo que me has dado, gracias por siempre estar para mí, por brindarme tu apoyo, por impulsarme a salir adelante y por siempre motivarme a ser mejor. Espero algún día regresarte todo lo que me has dado.

A mis hermanos, Oscar L. y Juan M., por apoyarme y estar siempre en mis fracasos y victorias, por preocuparse por mí y siempre cuidarme.

A la Familia Treviño Solís, Solís Sánchez, Alanís de la Fuente y Alanís Fuentes.

A Perla Treviño Solís por su apoyo incondicional.

A la Familia Castro Solís, por brindarme un hogar, gracias tía Ana por todo su infinito apoyo, sin duda las cosas fueron más fáciles gracias a usted. Gracias Gabriela por ser mi confidente, por siempre darme palabras de aliento, buenos consejos y por las largas pláticas en la madrugada. Beto gracias por hacer los días más agradables.

A mis amigas del alma, Miriam Cervantes y Ana Layda Medina por escucharme y darme palabras de aliento, gracias por siempre estar.

A mis amigos, Edgar de León y Luis David Ibarra, gracias por motivarme a nunca rendirme.

Al Dr. Héctor de León Gómez, por la dirección, asesoría y apoyo brindado en el desarrollo de la presente tesis, gracias infinitas. Al Dr. Arquímedes Cruz López, por su asesoría y revisión en el análisis de resultados y por toda la información proporcionada. A la Dra. Fabiola Doracely Yépez Rincón por su asesoría y apoyo en el transcurso de la investigación.

Al Dr. Miguel Ángel Martín del Campo, por su apoyo y sus comentarios brindados.

Al departamento de Geomática, en especial a M.C Roberto, Andrea y Alejandro.

Al departamento de Ingeniería Ambiental, en especial al Dr. Benjamín Limón, Dr. Carlos Joel Abrego, M.C Lirio Maria Reyna, M.C Alfredo y M.C Alejandra.

A mis compañeros de generación Camilo Jiménez, Bianca Esquivel, Gabriel Chávez y Flavio Ayala, sin duda alguna son unas excelentes personas, gracias por los buenos momentos. Gracias Camilo por el buen café colombiano, sin duda uno de los mejores. Gracias Gabriel por las buenas platicas. Gracias Bianca por ser una buena amiga.

A mis compañeros de maestría, en especial a Reynaldo Medina, Mariana Pérez, AnaKaren Saldaña y Manuel Ávila.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico durante el desarrollo de la investigación.

Por último, agradezco a todas aquellas personas que me apoyaron de una forma directa o indirecta en el desarrollo de la presente tesis.

"Lo que sabemos es una gota de agua; lo que ignoramos es el océano"

-Isaac Newton

CONTENIDO	PÁGINA
ÍNDICE DE FIGURAS.....	1
ÍNDICE DE TABLAS	4
RESUMEN.....	5
ABSTRACT	6
CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN	8
1.1 Situación del suministro de agua en la zona de estudio	9
1.2 Antecedentes.....	10
1.2.1 Estudios previos generales.....	10
1.2.3 Estudios previos en el área de estudio	12
1.2.3.1 Derrames de petróleo en la refinería “Héctor R. Lara Sosa”	13
1.2.4 Estudios previos sobre remediación en zonas contaminadas	14
1.2.5 Caracterización de terrazas con percepción remota	15
1.3 Hipótesis.....	16
1.4 Objetivos	16
1.4.1 Objetivo General.....	16
1.4.2 Objetivos Específicos.....	16
CAPITULO 2 GENERALIDADES	19
2.1 Descripción del área de estudio	19
2.2 Fisiografía	19
2.3 Clima.....	20
2.4 Hidrología.....	21
2.4.1 Precipitación y Temperatura.....	21
2.5 Hidrogeología	23
2.6 Geología.....	24
2.6.1 Regional.....	24
2.6.2 Local	25
CAPÍTULO 3 MARCO TEÓRICO	28
3.1 Geología.....	28
3.1.1 Formación de las Terrazas	28
3.2 Hidrología.....	30
3.2.1 Ciclo hidrológico	30
3.3 Hidrogeología.....	32

3.3.1 Acuífero.....	32
3.3.2 Tipos de Acuíferos	32
3.4 Hidrogeoquímica.....	34
3.4.1 Petróleo (Aceite fósil).....	35
3.4.2 Hidrocarburos.....	35
3.4.3 Benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX).	37
CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA.....	43
4.1 Caracterización Geológica	43
4.1.2 Carta Geológica.....	44
4.2 Caracterización Hidrogeológica.....	47
4.2.1 Aprovechamientos hidráulicos.....	47
4.2.1 Cartas piezométricas	51
4.3 Caracterización Fisicoquímica del Agua	54
4.3.1 Análisis fisicoquímicos del agua	55
4.3.2 Análisis de BTEX.....	67
CAPÍTULO 5 RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	73
5.1 Geología Estructural.....	73
5.2 Terrazas	74
5.2.1. Sedimentos Aluviales (SA)	74
5.2.2 Terraza 3.....	75
5.2.3 Terraza 2.....	76
5.2.4 Sedimentos Finos.....	76
5.2.5 Terraza 1.....	77
5.2.6 Formación Méndez.....	78
5.2 Hidrogeología	83
5.2.1 Cartas piezométricas	83
5.3 Fisicoquímica del Agua.....	88
5.3.1 Parámetros Fisicoquímicos.....	88
5.3.2 Agua subterránea	88
5.3.2.1 pH	88
5.3.2.2 Temperatura.....	89
5.3.2.3 Conductividad	91
5.3.2.4 Fosfatos	92

5.3.2.5 Alcalinidad Total CaCO_3	94
5.3.2.6 Nitrógeno Total (NT)	96
5.3.2.7 Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	98
5.3.2.8 Sólidos Totales (ST)	99
5.3.2.9 Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	101
5.3.2.10 Sólidos Disueltos Totales (SDT).....	102
5.3.2.11 Sólidos Totales Volátiles (STV)	104
5.3.3 Agua superficial	105
5.4 Cromatografía de Gases	118
5.4.1 Análisis de Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno (BTEX).	118
5.4.2 Agua subterránea	119
5.4.2.1 Benceno.....	119
5.4.2.2 Tolueno	123
5.4.3 Agua superficial	126
5.4.3.1 Benceno.....	126
5.4.3.2 Tolueno	129
5.4 Sitios contaminados visualmente identificados en campo	132
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	137
6.1 Conclusiones	137
6.2 Recomendaciones	139
Bibliografía.....	141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. El agua en el mundo (Centro Virtual de Información del agua, 2017).	8
Figura 2. Contaminantes involucrados en emergencias entre 2008-2015 en México (SEMARNAT, 2016).	11
Figura 3. Localización del área de estudio (Elaboración propia, con imagen de Google Earth, 2019).	19
Figura 4. Estación Climatológica: Cadereyta (19008), Nuevo León, Operando. Período: 01/04/1947 - 30/11/2017.	22
Figura 5. Estación Climatológica: Cadereyta (19008), Nuevo León, Operando. Período: 01/04/1947 - 30/11/2017.	22
Figura 6. Distribución de acuíferos en el estado de Nuevo León (Comisión Nacional del Agua, 2015).	23
Figura 7. Terrazas clasificadas acorde a la topografía: a) terrazas pares b) terrazas impares (Martínez Quiroga 2018).	30
Figura 8. Etapas del Ciclo hidrológico (Tarbuck et. al., 2005).	31
Figura 9. a) Acuífero de poros, en su mayor parte se trata de sedimentos sueltos (gravas, arenas). b) Acuífero de grietas, rocas consolidadas como areniscas, calizas no carstificadas, basaltos, granitos u otras rocas extrusivas e intrusivas, gneisses. c) Acuífero kárstico, rocas cárstificadas (calizas, dolomías, yeso) (Modificado de Werner, 1996).	32
Figura 10. Acuífero Libre y Semiconfinado (Núñez Mejía, 2019).	33
Figura 11. Acuífero Confinado (Núñez Mejía, 2019).	34
Figura 12. Clasificación de hidrocarburos (Morales, C., 2017)	36
Figura 13. Esquema metodológico propuesto general.	43
Figura 14. Esquema metodológico, cartografía de terrazas.	44
Figura 15. Conglomerado de la T1 (Coordenadas 406843E; 2828649 N)	45
Figura 16. Vuelo del dron PHANTOM 4 PRO.	46
Figura 17. Localización de los diferentes aprovechamientos hidráulicos.	51
Figura 18. Medición del nivel estático.	52
Figura 19. Equipo necesario para la medición del nivel estático.	53
Figura 20. Muestreadores de agua utilizados.	55
Figura 21. Muestras de agua para análisis en Laboratorio.	55
Figura 22. Dispositivo experimental (Cromatografía de Gases).	69
Figura 23. Curva de calibración de benceno.	70
Figura 24. Curva de calibración del Tolueno.	70
Figura 25. Familias de fracturas tipo "ac" y tipo "bc" en campo.	73
Figura 26. Representación en porcentajes de la familia de fracturas.	74
Figura 27. Sedimentos aluviales (SA) en el río Santa Catarina. Coordenadas UTM: 404580 E; 2826928 N.	75
Figura 28. Terraza 3. Coordenadas 404566 E; 2826934 N.	75
Figura 29. Terraza 2. Coordenadas UTM 407049 E; 2825166 N.	76
Figura 30. Sedimentos finos Coordenadas UTM 405557 E; 2826736 N.	76
Figura 31. Terraza 1. Coordenadas UTM 407530 E; 2829211N.	77
Figura 32. Terraza 1 en contacto con la Formación Méndez. Coordenadas UTM: 402726 E; 2831212 N.	77

Figura 33. Contacto de la Formación Méndez con la terraza 1 (Refinería). Coordenadas UTM 404215 E; 2829177 N.	78
Figura 34. Contacto de la Formación Méndez con los sedimentos aluviales. Coordenadas UTM 407615 E; 2824948 N.	78
Figura 35. Ortomosaico P1.	79
Figura 36. Ortomosaico P2.	80
Figura 37. Ortomosaico P3.	80
Figura 38. Carta Geológica del área de estudio.	82
Figura 39. Carta piezométrica correspondiente al mes de octubre del 2019.	84
Figura 40. Carta piezométrica correspondiente al mes de noviembre del 2019.	85
Figura 41. Carta piezométrica correspondiente al mes de agosto del 2020.	86
Figura 42. Niveles estáticos durante los años 2019-2020.	87
Figura 43. Niveles piezométricos durante los años 2019-2020.	87
Figura 44. Resultados de pH (In-Situ) de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).	89
Figura 45. Resultados de Temperatura (In-Situ) de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).	90
Figura 46. Resultados de Conductividad (In-Situ) de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).	92
Figura 47. Resultados de Fosfatos de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).	93
Figura 48. Diagrama de Berjum de la relación entre el pH y la proporción relativa de especies de carbono inorgánico: (+H ₂ CO ₃), HCO ₃ ⁻ y CO ²⁻ en las aguas naturales (Schwarzenbach y Meier, 1958).	95
Figura 49. Resultados de Alcalinidad Total CaCO ₃ de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).	96
Figura 50. Resultados de NT de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).	98
Figura 51. Resultados de DQO de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).	99
Figura 52. Resultados de ST de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).	100
Figura 53. Resultados de SST de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).	102
Figura 54. Resultados de SDT de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).	103
Figura 55. Resultados de STV de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).	104
Figura 56. Resultados de pH (In-Situ) de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).	106
Figura 57. Resultados de Temperatura(In-Situ) de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).	107

Figura 58. Resultados de Conductividad (In-Situ) de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).	108
Figura 59. Resultados de Fosfatos de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).	109
Figura 60. Resultados de Alcalinidad total como CaCO_3 de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).	110
Figura 61. Resultados de Nitrógeno Total de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).	111
Figura 62. Resultados de DQO de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).	113
Figura 63. Resultados de Sólidos Totales de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).	114
Figura 64. Resultados de SST de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).	115
Figura 65. Resultados de SDT de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).	116
Figura 66. Resultados de STV de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).	117
Figura 67. Concentración en ppm de benceno.	120
Figura 68. Mapas temáticos de la distribución del parámetro benceno en Agua subterránea.	122
Figura 69. Concentración en ppm de tolueno.....	123
Figura 70. Mapas temáticos de la distribución del parámetro tolueno en agua subterránea.	125
Figura 71. Concentración en ppm de benceno.	126
Figura 72. Mapas temáticos de la distribución del parámetro benceno en agua superficial.	128
Figura 73. Concentración en ppm de Tolueno.	129
Figura 74. Mapas temáticos de la distribución del parámetro tolueno en agua superficial.	130
Figura 75. Puntos de contaminación visual localizados en la zona de estudio.....	132
Figura 76 . AR-1 “Arroyo-Vaquitas”, Coordenadas:14R 407939m E,2830064m N.	133
Figura 77. AR-2 “Arroyo-COV”, Coordenadas:14 R 407611 m E, 2830372 m N.	133
Figura 78. BR-1 “Barda Refinería”, Coordenadas: 14 R 405863 m E, 2828817 m N.	134
Figura 79. BR-2 “Árboles negros, Coordenadas: 14R 404256 m E, 2830151 m N.....	134
Figura 80. LR-1 “Lonas”, Coordenadas: 14R 405953 m E, 2828857 m N.....	135

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los aprovechamientos hidráulicos.....	47
Tabla 2. Aprovechamientos hidráulicos localizados en el área de estudio.....	48
Tabla 3. Aprovechamientos hidráulicos con sus respectivas coordenadas, elevación del terreno, niveles estáticos y niveles piezométricos obtenidos (2019). Valores correspondientes a la carta piezométrica octubre del 2019.....	53
Tabla 4. Tiempos de retención de los BTEX empleando una columna capilar de sílice. Thorno=110°C, Tdetector= 250°C y Pinjector= 12 Psia.	69
Tabla 5. Clasificación de aguas naturales por su conductividad eléctrica (APHA, 1995); Claudio Gómez, O. G., 2018).....	91
Tabla 6. Clasificación de la dureza del agua en mg/L CaCO ₃	94
Tabla 7. Clasificación del agua de acuerdo a los TDS (APHA, 1995).....	103
Tabla 8. Características fisicoquímicas de los BTEX.....	118
Tabla 9. Límites Máximos Permisibles para BTEX.....	119

RESUMEN

El agua es un recurso de vital importancia para los seres vivos. Uno de los principales problemas ambientales es la contaminación de aguas superficiales y subterráneas impactadas por fuentes industriales, que amenazan la calidad y suministro de agua potable hacia las poblaciones. El objetivo principal de la presente investigación fue evaluar la presencia de contaminantes ambientales en el río San Juan para determinar el impacto de la refinería “Héctor R. Lara Sosa”, en sus aguas superficiales y subterráneas a través de métodos geológicos, hidrogeológicos y químicos. Con estudios de trabajo de campo y gabinete, se identificaron las terrazas 1, 2, 3, sedimentos finos y sedimentos aluviales, así como las lutitas de la formación Méndez a lo largo del río San Juan, cuyo producto fue la elaboración de la carta geológica en escala 1: 30,000. En ella se obtuvieron dos sistemas de fracturamiento “ac” y “bc”, que representan las direcciones del flujo del agua subterránea y contaminantes. También, se elaboraron tres cartas piezométricas, correspondientes a la época ordinaria-sequia, escala 1: 35,000, cuyos resultados muestran la dirección preferencial del flujo del agua subterránea y contaminantes BTEX, siendo esta de noroeste a sureste. Así mismo se recolectaron muestras de agua superficial y subterránea para análisis fisicoquímicos y análisis BTEX en laboratorio a través de cromatografía de gases con detector de ionización de flama (CG-FID). Los resultados de BTEX en agua superficial y subterránea arrojaron concentraciones de benceno y tolueno que superan los límites máximos permisibles (LMP) establecidos por las distintas agencias regulatorias. Con la integración de los resultados anteriores, se puede concluir que los recursos hídricos en la zona de estudio se encuentran afectados por la presencia de hidrocarburos provenientes de la refinería y a su vez generan un impacto negativo en la calidad del agua del río San Juan, colector principal de la presa “El Cuchillo”, fuente superficial para abastecimiento de agua potable de Monterrey y su zona conurbada.

ABSTRACT

Water is a vitally important resource for living beings. One of the main environmental problems is the contamination of surface and groundwater impacted by industrial sources, which threatens the quality and supply of drinking water to populations. The main objective of this research was to evaluate the presence of environmental pollutants in the San Juan river to determine the impact of the “Hector R. Lara Sosa” refinery, on its surface and underground waters through geological, hydrogeological and chemical methods. With area and cabinet work studies, terraces 1, 2, 3, fine sediments and alluvial sediments, as well as the shales of the Méndez formation along the San Juan River, were identified, the product of which was the elaboration of the geological map. at 1: 30,000 scale. In the field, two fracturing systems “ac” and “bc” were obtained, which represent the flow directions of groundwater and contaminants. Also, three piezometric charts were prepared, corresponding to the ordinary-drought season, scale 1: 35,000, whose results show the preferential direction of the flow of groundwater and BTEX pollutants, being this from northwest to southeast. Likewise, samples of surface and underground water were collected for physicochemical analysis and BTEX analysis in the laboratory through gas chromatography with flame ionization detector (CG-FID). The BTEX results in surface and ground water showed concentrations of benzene and toluene that exceed the maximum permissible limits (MPL) established by the different regulatory agencies. With the incorporation of the previous results, it can be concluded that, the water resources in the study area are affected by the presence of hydrocarbons from the refinery and at the same time generate a negative impact on the quality of the water of the San Juan river, the main collector of the “El Cuchillo” dam, a surface source for the supply of drinking water in Monterrey and its metropolitan area.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para el desarrollo de la vida en el planeta, y un elemento esencial para los seres vivos. El uso del agua ha ido en aumento debido al alto crecimiento poblacional y a las diversas actividades en las que se utiliza el recurso, tales como, para uso doméstico, agrícola, ganadería e industrial (Véase Figura 1). (SEMARNAT, 2016; WWAP, T.,2019). Recursos como el agua, el suelo, la energía y una gran variedad de minerales metálicos y no metálicos representan un importante foco de la geología, ya que son la base de la civilización moderna. La geología aborda la existencia de estos recursos, las formaciones geológicas, su conservación, el impacto de su extracción al medio ambiente y su uso (Tarbuck *et. al.*, 2005).

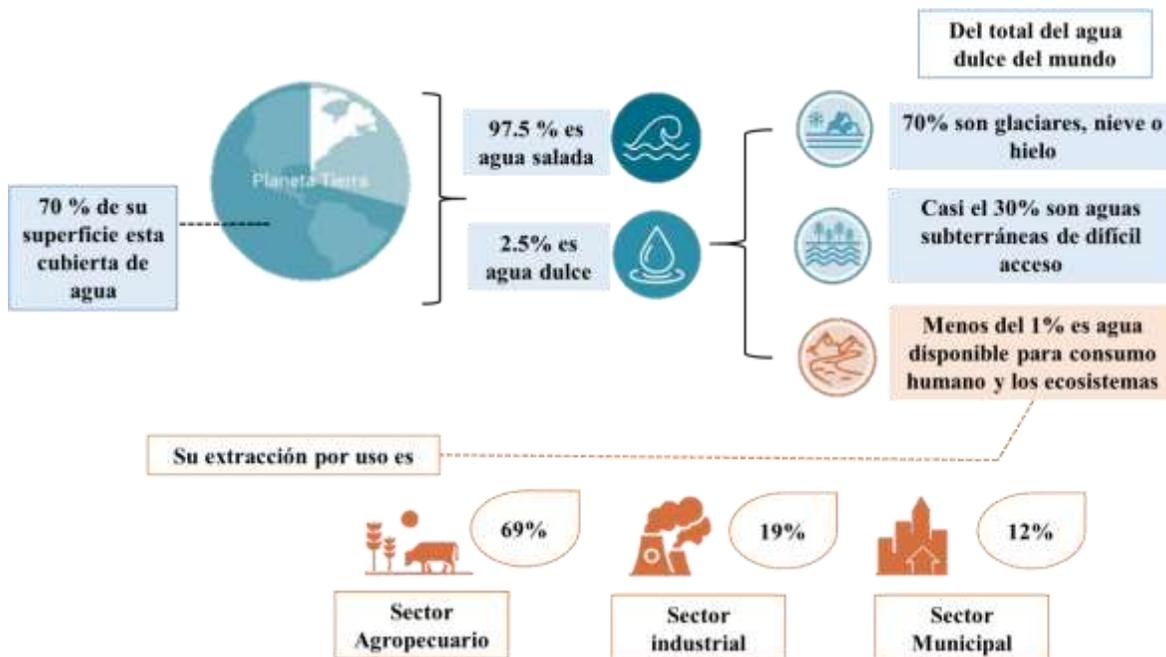


Figura 1. El agua en el mundo (Centro Virtual de Información del agua, 2017).

Existen distintas fuentes y tipos de contaminación que amenazan los suministros de agua superficial y subterránea. En el mundo y a nivel nacional los principales problemas de contaminación de suelos y agua se deben a acciones antropogénicas. Resultan fuentes potenciales de contaminación, los productos químicos, materiales industriales, los fertilizantes que se extienden por toda la superficie del terreno, los pesticidas, las aguas residuales industriales o domésticas, derrames de

hidrocarburos, entre otras. Por ello, la determinación y el control de sustancias tóxicas persistentes en los cuerpos de agua es necesaria e importante para proteger la salud humana y el medio ambiente (Tarbuck *et. al.*, 2005; Guo, *et. al.*, 2011). No obstante, un tipo de contaminación menos frecuente, pero con altos índices de impacto al ambiente es el que se produce por la presencia de hidrocarburos en el agua subterránea, debido a que su complejidad afecta directamente su degradación y por lo general los hace muy persistentes en el medio ambiente. La contaminación por hidrocarburos se debe generalmente a derrames accidentales, mal manejo o intencionados en el ambiente. Es importante investigar y monitorear las instalaciones petroleras para evaluar los daños que se pueden generar y así prevenir y reducir el impacto negativo en el medio ambiente (Brito *et. al.*, 2015).

1.1 Situación del suministro de agua en la zona de estudio

El agua suministrada al Área Metropolitana de Monterrey (AMM) se extrae principalmente de fuentes superficiales que están constituidas por 3 presas de almacenamiento (El Cuchillo, La Boca y Cerro Prieto) y fuentes subterráneas que están compuestas por 46 pozos profundos ubicados en el municipio de Mina, en el campo Buenos Aires y en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM), 50 someros (AMM), 1 manantial (La Estanzuela), 3 túneles (Cola de Caballo I y II, y San Francisco) y una galería filtrante (La Huasteca). Las aguas que fluyen por el cauce del río Santa Catarina desembocan en el río San Juan, a éste se le une el río La Silla, para finalmente desembocar sus escurrimientos en la presa El Cuchillo (Flores Laureano, 1997; Ramírez Gallegos, 2017; Martínez Quiroga, 2018).

Con base en estudios anteriores se han presentado casos en los que se reporta contaminación en las aguas de los ríos Santa Catarina y San Juan por fuentes de aguas residuales provenientes de industrias o domésticas, por la presencia de metales pesados y contaminantes emergentes (Ramírez Gallegos, 2017; Martínez Quiroga, 2018). Esto representa un problema, ya que el vertido de descargas puntuales sin previo tratamiento puede provocar cambios significativos en la calidad del agua superficial y subterránea.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Estudios previos generales

La contaminación por hidrocarburos provoca un impacto ambiental, ya que contienen compuestos químicos tóxicos que producen daños a la flora y la fauna, también causan daños a la calidad del suelo y finalmente del agua (ya sea superficial o subterránea).

En el año 2002, Nava realizó una investigación sobre el Impacto Regional de la refinería Miguel Hidalgo, en Tula de Allende, Hidalgo. La investigación estableció un análisis crítico del impacto de la refinería con la calidad de vida de las comunidades circundantes. Se determinó que existe contaminación del agua, suelo y aire causada por la refinería y diversas compañías (empresas cementeras, textiles y termoeléctricas). Se determinó que la contaminación de agua tanto superficial como subterránea tenía un impacto negativo en el acuífero, suelo y subsuelo y en la biodiversidad.

Más tarde en el año 2015, Zhang *et. al.*, realizaron un estudio que evaluó el riesgo potencial que representa el contenido y enriquecimiento de metales pesados y metaloides en los sedimentos de la Costa del Golfo. Los resultados mostraron que las muestras tomadas a poca distancia de la refinería local contenían una mayor concentración de metales pesados y metaloides. Lo anterior concluyó que la refinería de petróleo es una fuente potencial de la contaminación de metales traza.

En un estudio reciente, Meyer *et. al.*, (2019), desarrollaron un monitoreo en tiempo real de la calidad del agua para identificar vías de contaminación en ríos de pequeña y mediana escala. El monitoreo en tiempo real siempre aporta ideas y conocimientos fundamentales sobre los procesos cruciales que afectan el estado químico y la situación ecológica en cuencas hidrológicas. Con estas técnicas se puede identificar y describir la cantidad total de impactos, sus fuentes y las vías de emisión, sin embargo, los altos costos de material, consumo y mantenimiento, limitan su uso a investigaciones exclusivas.

1.2.2 Contaminación de Benceno, Tolueno, Metilbenceno, Xileno (BTEX)

En México, la calidad del agua se vigila mediante la red de monitoreo, con cuatro parámetros principales: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Coliformes Fecales (CF), estos parámetros nos permiten identificar si la calidad del agua es idónea para determinados usos; como: el consumo humano o el uso de agua para riego. La CONAGUA reportó que el 41% de los cuerpos de agua en el año 2018 tenían límites aceptables de calidad de agua, sin embargo, el resto de los cuerpos de agua presentaban buena calidad a fuertemente contaminada (CONAGUA, 2018).

Cordova, *et. al.*, (2019), dan a conocer una revisión en donde muestran la situación actual de BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xilenos) como contaminantes en el mundo. Realizaron una revisión de las fuentes comunes de BTEX en agua y compararon los valores con las normativas internacionales adecuadas, los BTEX son considerados como contaminantes prioritarios debido a su toxicidad.

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en el año 2016, reportó los contaminantes ambientales involucrados en emergencias ambientales en el periodo 2008 a 2015, en donde se muestra como los hidrocarburos ocupan el mayor porcentaje de contaminación (Véase Figura 2).

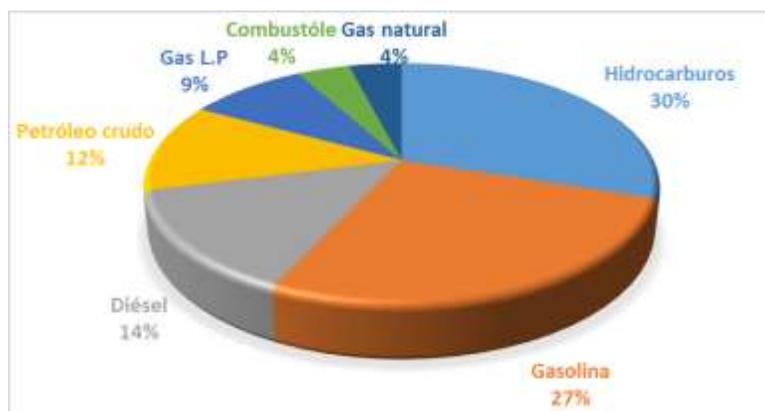


Figura 2. Contaminantes involucrados en emergencias entre 2008-2015 en México (SEMARNAT, 2016).

1.2.3 Estudios previos en el área de estudio

En el año 1996, Ayala Cruz, realizó una evaluación de la calidad fisicoquímica y bacteriológica en el acuífero granular de Cadereyta Jiménez, N. L., en el cual analizó el agua de 42 aprovechamientos hidráulicos (pozos, norias y agua de río). Respecto al análisis bacteriológico los resultados mostraron que la mayoría de los aprovechamientos hidráulicos no cumplen con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Con respecto a los análisis fisicoquímicos, solamente 5 muestras de agua cumplieron con la NOM-127-SSA1-1994.

Un año más tarde en 1997, Flores Laureano, evaluó la calidad del agua en el río San Juan, mediante análisis fisicoquímicos, bacteriológicos y metales pesados. Determinó que para la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA-1994) para agua potable se excedieron 19 de 24 parámetros analizados, siendo los que presentan mayores valores los coliformes fecales (>100 mg/L), coliformes totales (>100 mg/L), color (>50 mg/L), turbiedad (>10 mg/L), aluminio (>0.5 mg/L), fierro (>0.3 mg/L) y cadmio (>0.005 mg/L); los menores fueron mercurio (<0.001 mg/L), nitritos (<0.05 mg/L), pH (7.8), plomo (<1 mg/L) y cromo (<0.03 mg/L).

En 1998, De la Garza Garza, evaluó y analizó el grado de contaminación de las aguas de la cuenca del río San Juan mediante parámetros como Conductividad, Sólidos, pH, Alcalinidad, Cloruros, Sulfatos, Dureza, Oxígeno Disuelto, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO). Determinó que las aguas arriba de la presa el Cuchillo cumplieron con la Norma Mexicana NOM-127-SSA1-1994 y los Criterios Ecológicos, en cambio las aguas abajo pasaron los límites máximos permisibles para Sólidos totales (>1000 mg/L), Cloruros (>250 mg/L), Sulfatos (400 mg/L), Dureza (500 mg/L) y Oxígeno Disuelto (>3 mg/L).

En el 2017, Ramírez Gallegos, realizó una caracterización hidrogeológica de metales pesados en el río Santa Catarina, destacó que, aunque las concentraciones no rebasan los límites máximos permisibles fijados en la norma de agua residual, son concentraciones anormales, reflejándose la contaminación en los alrededores.

Señala que es evidente que las concentraciones de metales pesados son influenciadas por las descargas de agua residuales sin tratamiento.

En el 2018, Martínez Quiroga, realizó una caracterización geológica del río Santa Catarina, en donde identificó 4 niveles de terrazas y documentó cada punto de posible fuente contaminante, específicamente en el río, identificó un total de 154 fuentes de descargas hacia el río. Los análisis mostraron la presencia de contaminantes emergentes (cocaína, anfetaminas, bisfenol-A, entre otros) y metales pesados (arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, zinc, entre otros). A su vez, en el año 2020, Cruz-López, A., *et.al.* (2020), identificaron la presencia de Bisfenol A (BPA) y bis (2-etilhexil) ftalato (DEHP) en el agua superficial y subterránea, los niveles más altos detectados fueron 0,9 para BPA y 60 $\mu\text{g L}^{-1}$ para DEHP.

1.2.3.1 Derrames de petróleo en la refinería “Héctor R. Lara Sosa”

En el año 2014, medios de comunicación Expansión, Milenio y El Economista publicaron sobre el derrame provocado por una toma clandestina en el oleoducto Madero-Cadereyta de Pemex en la cuenca del río San Juan. Aproximadamente 4 mil barriles de petróleo, generaron daños ecológicos en casi 23 km del río San Juan, por su parte La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) aseguro la contaminación de la flora y fauna de la zona. El derrame afectó canales que se utilizaban para el riego de campos agrícolas en las comunidades de San Juan, Mexiquito, Santa Isabel, Dolores y Soledad Herreras. Como método para evitar la expansión del derrame trabajadores de Pemex se encargaron de colocar barreras flotantes y arrancar las plantas acuáticas impregnadas del chapopote.

El 2018, Cuevas, *et. al.*, analizaron los efectos sociales, económicos y ecológicos causados por el derrame de petróleo en el río San Juan. Realizaron encuestas en varios ejidos en el municipio de Cadereyta (Nuevo León, México), en donde los resultados mostraron que el siniestro produjo una alteración en el funcionamiento habitual de las actividades de las comunidades afectadas.

Recientemente en el 2020, se presentaron derrames en las lagunas de almacenamiento de la refinería “Héctor R. Lara Sosa”, los residuos tóxicos

contaminaron el Arroyo El Ayancual, que desfoga al río San Juan y de ahí a la Presa El Cuchillo fuente principal de abastecimiento para el Área Metropolitana de Monterrey (El norte, 2020).

1.2.4 Estudios previos sobre remediación en zonas contaminadas

En el año 2014, García *et. al.*, realizaron una evaluación del riesgo a la salud en la zona 7, contaminada con benceno del pasivo ambiental generado por la “Ex-refinería 18 de marzo” en la Ciudad de México. Para la remediación de la zona se utilizaron dos métodos, el primero consistió en una inyección de aire atmosférico por debajo de la zona contaminada, creando una pantalla de microburbujas, para eliminar los contaminantes disueltos y adsorbidos en la zona no saturada. El segundo método es el proceso inverso (bioventing/extracción de vapor), es decir, se utilizan los pozos de extracción de vapores, por los cuales se extraen fracciones de compuestos volátiles y semi-volátiles de hidrocarburos adsorbidos y tratados en la zona no saturada. Para la descontaminación de la zona, PEMEX contrato diferentes compañías que implementaron diferentes métodos, como la extracción de vapores, la oxigenación del suelo y la descontaminación con compuestos orgánicos. Para finalizar fue necesario el desmantelamiento de las instalaciones y el retiro de los residuos almacenados de hidrocarburos.

En el año 2017, Rodríguez Calvo, publicó sobre la biorremediación de aguas contaminadas con hidrocarburos mediante sistemas Bio-Absorbentes. Diseño biorreactores en lo que se instalaron materiales absorbentes en su interior. Partió de un diseño experimental, realizando ensayos a escala laboratorio hasta la instalación de una planta piloto. Combino la retención de hidrocarburos por absorción y la biodegradación de los mismos mediante la acción de la microbiota autóctona adherida a los soportes absorbentes empleados.

Por otra parte, Karlapudi *et. al.*, 2018 utilizaron en la remediación de la contaminación por hidrocarburos biosurfactantes (BS) debido a sus ventajas tales como la biodegradabilidad y baja toxicidad. El estudio demostró que la bacteria *Pseudomonas aeruginosa* degradó efectivamente un rango de hidrocarburos como el 2-metilnaftaleno, tetradecano y pristina. También realizaron otro experimento, con

suelo contaminado con hidrocarburos, el cual se inoculó con *Acinetobacter haemolyticus* y *Pseudomonas* (cepas productoras de biosurfactante) y la degradación de los hidrocarburos se estudiaron, luego de completar el período de incubación de 2 meses, se logró la reducción de los hidrocarburos (39–71%) y (11–71%), respectivamente. Se llegó a la conclusión que la aplicación de biosurfactantes es una alternativa prometedora en la industria del petróleo para la biorremediación de derrames de petróleo.

1.2.5 Caracterización de terrazas con percepción remota

Parte importante del entendimiento de los procesos geoambientales tiene que ver con las características geomorfológicas del río. Las terrazas fluviales representan las principales características geomorfológicas para entender la historia evolutiva de los ríos y el cómo los contaminantes son transportados por el medio. En los últimos años, la caracterización de las terrazas se ha realizado con el uso de teledetección, entre las técnicas más comunes se encuentran el LIDAR (*Light detection and ranging*) y fotogrametría aérea obtenida, la cual se ha implementado recientemente con el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAS, por sus siglas en inglés) o también conocidos como drones, ya que permiten obtener imágenes de alta resolución de la superficie terrestre de sitios de difícil acceso y con mayor frecuencia de muestreo.

Las técnicas de percepción remota permiten abarcar grandes áreas de la superficie terrestre, genera fotografías aéreas y crea, mediante softwares específicos, modelos digitales de elevación (MDE), ortomosaicos y nubes de puntos de alta resolución, entre otros (Ferreira M., *et. al.*, 2017; Claros Z., *et. al.*, 2016) que son de gran utilidad para el mapeo preciso de las distintas terrazas.

Por ejemplo, en el 2007, Demoulin *et. al.*, desarrollaron un método de reconocimiento de terrazas fluviales a partir de MDE, demostrando que es posible el mapeo autónomo y extensivo de las terrazas.

En el año 2018, Ruales Salazar, realizó una investigación en la cual demuestra como el levantamiento topográfico con uso de drones aéreos tiene más ventajas y

es más factible de realizar comparado con un levantamiento topográfico convencional. El estudio concluyó que el costo por hectárea levantada con el uso de un drone era más económica comparada con topografía convencional.

Un año más tarde, en el 2019, Li. H., *et. al.*, localizaron, evaluaron y analizaron terrazas fluviales en una zona de Xiaobangshuiya (China), demostraron que el uso de drones, proporcionaba un conjunto de datos de alta precisión en zonas complejas y de difícil acceso, comprobando que se tienen ventajas, tales como bajo costo, alta eficiencia, resolución a nivel de centímetros y gran extensión espacial.

1.3 Hipótesis

La refinería “Héctor R. Lara Sosa” origina la presencia de contaminantes en el río San Juan y el medio geológico facilita la infiltración y transporte de contaminantes ambientales hacia el agua superficial y subterránea alterando su calidad.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar la presencia de contaminantes ambientales en el río San Juan para determinar el impacto de la refinería “Héctor R. Lara Sosa”, hacia sus aguas superficiales y subterráneas a través de métodos geológicos, hidrogeológicos y químicos.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Caracterización geológica de las terrazas (estructura y composición) del río San Juan (Carta geológica a escala 1:30,000), a través de perfiles geológicos, uso de drones y de fotointerpretación.
- Documentar las distintas fuentes potenciales de contaminación por hidrocarburos.
- Realizar mediciones del nivel del agua en aprovechamientos hidráulicos (pozos, norias) destinados al abastecimiento del agua potable.

- Realizar muestreos de agua superficial y subterránea en puntos aledaños a la refinería.
- Elaborar carta piezométrica de la zona de estudio para determinar las direcciones de flujo del agua subterránea.
- Determinar en laboratorio la concentración de BTEX en las muestras de agua recolectadas y realizar una comparativa con respecto a las Normas ambientales.
- Proponer alternativas de remediación y/o saneamiento de las áreas contaminadas del río San Juan adecuadas a la problemática de la zona de estudio, cuyo propósito sea disminuir la contaminación de las aguas escurridas hacia el vaso de la presa El Cuchillo, fuente superficial de abastecimiento de agua potable.

CAPÍTULO 2

GENERALIDADES

CAPITULO 2 GENERALIDADES

2.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra dentro de la cuenca del río San Juan, al sureste de Cadereyta Jiménez, N.L. con más de 9 Km de largo sobre el cauce. El polígono lo delimitan las coordenadas UTM 402029E; 2830280N y 408387E; 2824610 N.

En la Figura 3, se muestra el área de estudio general la cual comprende un tramo del río Santa Catarina - San Juan, tomando en cuenta el cauce del río y la zona donde se localiza la refinería "Héctor R. Lara Sosa".

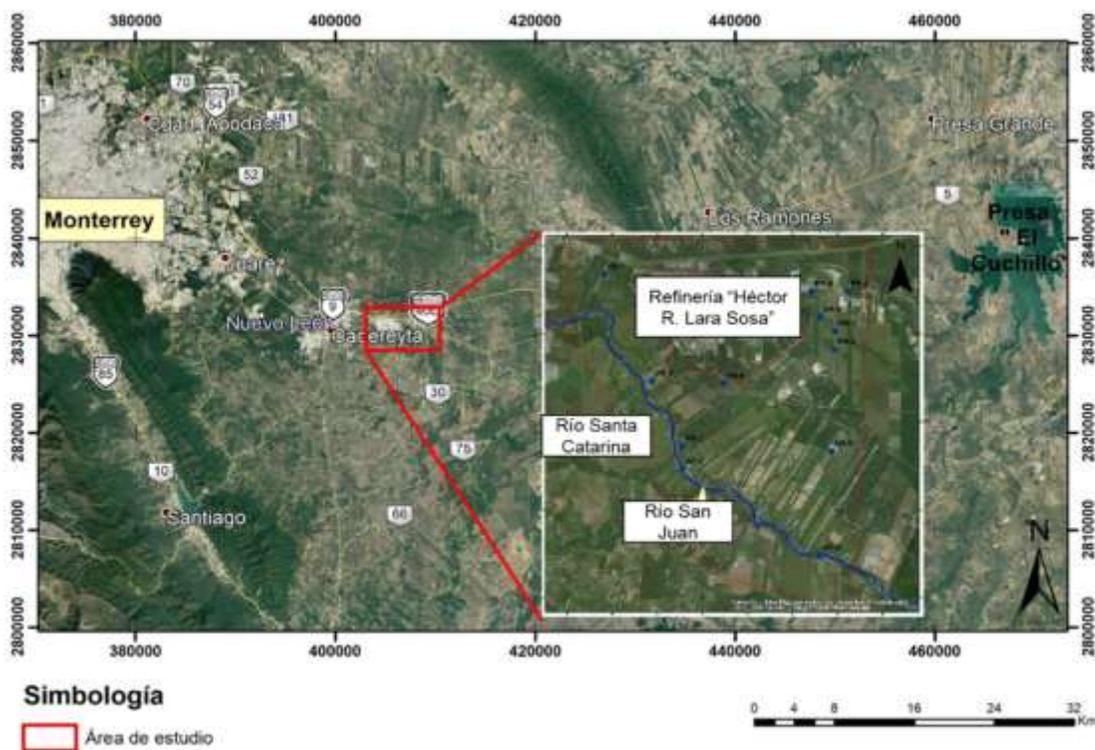


Figura 3. Localización del área de estudio (Elaboración propia, con imagen de Google Earth, 2019).

2.2 Fisiografía

México tiene una variedad de formas de relieve, lo cual lo convierte en un país con mayores características y variedades topográficas. Las cuales influyen en las condiciones climáticas, tipos de suelos y vegetación, e incluso en las actividades económicas (SEMARNAP, 1997).

La cuenca del río San Juan se encuentra en la Región Hidrológica “Río Bravo” (Región 24b) y tiene un área aproximada de 33,000 Km², correspondientes a los estados de Coahuila (40%), Nuevo León (57%) y Tamaulipas (3%); en Nuevo León tiene una superficie de 19,804 Km² aproximadamente (INEGI, 1986). El área de estudio se ubica dentro de las provincias fisiográficas de la Sierra Madre Oriental (SMOr) y la Llanura Costera del Golfo Norte (LCGN). La SMOr es una cadena montañosa de aproximadamente 1,350 km de longitud con dirección noroeste-sureste, que se extiende desde el sur del río Bravo y corre paralela al Golfo de México hasta unirse en el sur con el Cinturón Volcánico Mexicano; está compuesta principalmente por una gruesa secuencia de rocas carbonatadas y terrígenas del Mesozoico y cuyo relieve se debe a su misma deformación al haber sido levantadas, comprimidas y transportadas hacia el noreste, formando pliegues y cabalgaduras por los esfuerzos de la Orogenia Laramide durante el Paleoceno tardío-Eoceno temprano. La SMOr está dividida en ocho subprovincias; Serranía del Burro, Sierras y Llanuras Coahuilenses, Sierra de la Paila, Pliegues Saltillo Parras, Sierras Transversales, Gran Sierra Plegada, Sierras y Llanuras Occidentales y Carso Huasteco de las cuales dos se encuentran dentro del área de estudio: Sierras y Llanuras Coahuilenses y Gran Sierra Plegada. En cambio, la Llanura Costera del Golfo Norte emergió en la era Cenozoica y sus llanuras están formadas por materiales marinos cubiertos por un delgado aluvión, está presente en los estados de Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí y Veracruz. La LCGN está dividida en cuatro subprovincias; Llanuras y Lomeríos, Llanura Costera Tamaulipeca, Sierra de San Carlos y Sierra de Tamaulipas, de las cuales solamente la subprovincia Llanuras y Lomeríos se encuentra dentro del área de estudio (Padilla y Sánchez, 1985; INEGI, 2009).

2.3 Clima

El clima es el “Sumario estadístico o promedio de cada uno de los elementos meteorológicos como la lluvia, la temperatura, el viento, entre otros; a través de un número dado de años”. En el país existen distintos tipos de climas, según la clasificación mundial de tipos de clima, propuesta por Wladimir Köppen (1936). En

el Estado de Nuevo León predominan los climas secos y en menor ocurrencia o demencia el clima Templado (INEGI, 2005; García González, 2017).

De acuerdo al prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos en el municipio de Cadereyta Jiménez predomina un clima Semicálido subhúmedo con lluvias escasas, todo el año (94%), semiseco subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (5.5%) y semiseco subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (0.5%) (INEGI, 2009).

2.4 Hidrología

El río San Juan es el segundo afluente de importancia del río Bravo, nace en el Arroyo la Chueca en Nuevo León, el arroyo baja en dirección sureste hasta la Presa Rodrigo Gómez, a partir de este punto continua con el nombre de San Juan, cambiando su dirección hacia el norte, recibe la confluencia del río Santa Catarina y del río Ramos. Más adelante recibe los afluentes del Arroyo Garrapatas, el río Pílon y el Arroyo Mohinos, continuando su curso recibe por la margen izquierda el aporte del río Pesquería, aguas abajo de la presa “El Cuchillo”, finalmente desemboca en el río Bravo en Tamaulipas (Flores Laureano, 1997; Ayala Cruz, 1996; Martínez Quiroga, 2019). Toda el agua que circula en el río San Juan va a dar a la presa El Cuchillo que es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua del Área Metropolitana de Monterrey. Siguiendo su cauce el río San Juan descarga en el río Bravo un poco después de la Ciudad de Camargo, Tamaulipas.

2.4.1 Precipitación y Temperatura

Dentro del área de estudio se encuentra la estación meteorológica Cadereyta (19008), la cual muestra el Promedio Diario de Lluvia del año 1947 al 2017, siendo los meses de agosto, septiembre y octubre los que presentan las mayores precipitaciones con 2.9 (mm), 5.4 (mm), y 3 (mm), respectivamente (Véase Figura 4).

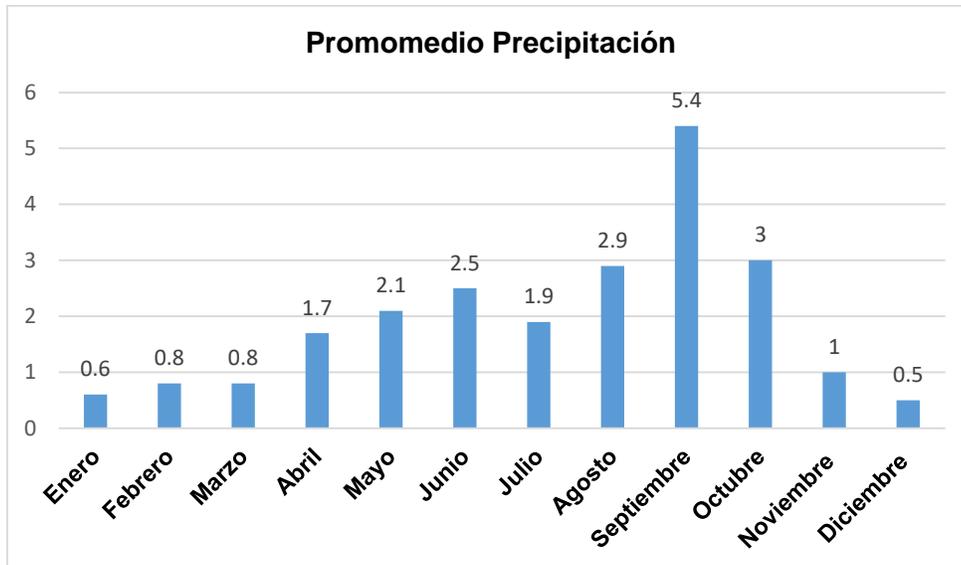


Figura 4. Estación Climatológica: Cadereyta (19008), Nuevo León, Operando. Período: 01/04/1947 - 30/11/2017.

En la Figura 5, se muestran los valores correspondientes a la temperatura media por mes del año 1497 al 2017, siendo los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre los que presentan las temperaturas más altas (Gobierno del Estado, 2019).

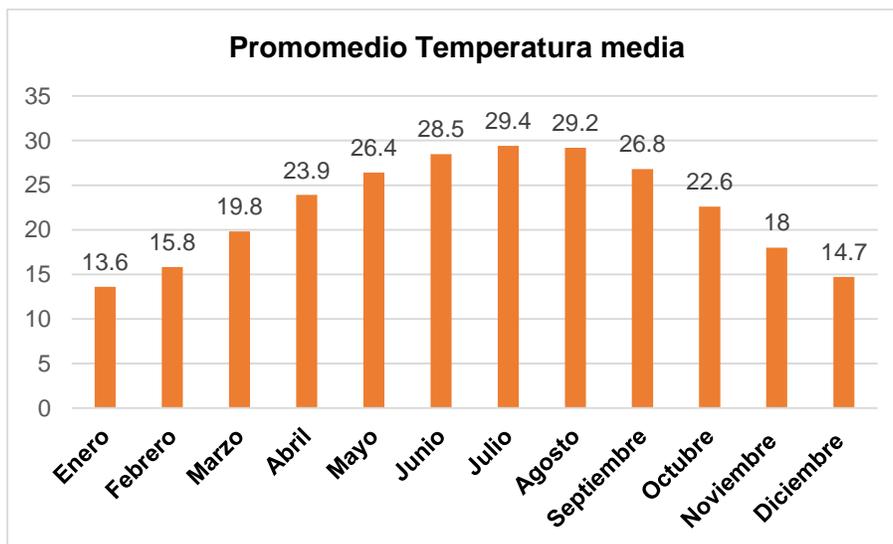


Figura 5. Estación Climatológica: Cadereyta (19008), Nuevo León, Operando. Período: 01/04/1947 - 30/11/2017.

2.5 Hidrogeología

El estado de Nuevo León cuenta con diversos acuíferos distribuidos a lo largo del estado, el área de estudio se encuentra en la Región Hidrológica “Río Bravo” y a su vez dentro del Acuífero Citrícola Norte (Véase Figura 6). Los aprovechamientos que explotan el acuífero son 742 (pozos y norias) distribuidos por uso del agua subterránea en 377 agrícolas, 280 doméstico-pecuario, 68 público urbano y 17 industriales (Conagua, 2009). El acuífero Citrícola Norte está formado por los Depósitos Aluviales y el Conglomerado Reynosa, que rellenan los valles de los ríos El Pílon y Garrapatas. La Formación Méndez aflora en la cima y es subyacida por los depósitos de relleno. Esta formación está constituida principalmente por lutitas y margas, de baja permeabilidad, la cual aumenta en las zonas en donde hay sistemas de fallas y fracturas. Las fronteras laterales del Acuífero Citrícola Norte son las siguientes: al norte el cauce del río San Juan; al sur y oriente el parteaguas superficial entre las Cuencas del río San Juan y río San Fernando, que se localiza en la Mesa Alta del Ebano; y al poniente el límite impermeable de la falla de cabalgadura frontal de la Sierra Madre Oriental (Ayala Cruz, 1996; Diario Oficial de la Federación, 2015).



Figura 6. Distribución de acuíferos en el estado de Nuevo León (Comisión Nacional del Agua, 2015).

2.6 Geología

2.6.1 Regional

La región norte y noreste de México se caracteriza por la presencia predominante de rocas sedimentarias mesozoicas plegadas, que descansan sobre un basamento paleozoico y precámbrico. La SMOr está constituida principalmente por una gran secuencia de rocas carbonatadas y terrígenas de origen Mesozoico con plegamientos alargados y cabalgados por esfuerzos máximos de la Orogenia Laramide durante el Paleoceno Tardío – Eoceno Temprano (Zenteno,1984; INEGI, 1990).

La “Curvatura de Monterrey”, es uno de los rasgos fisiográficos más significativos de la SMOr, con orientación general Este-Oeste. La estratigrafía de la SMOr es muy variada, presenta distintas rocas, tales como rocas siliciclásticas, carbonatadas y sulfatadas que van de edades desde el Triásico superior hasta el cuaternario. Al norte de esta flexión los elementos orográficos se vuelven más espaciados, y las estructuras geológicas menos estrechas; además, el relieve disminuye gradualmente al oriente, hasta constituirse en la Llanura Costera del Golfo (Zenteno,1984; INEGI, 1990; Martínez Quiroga, 2019).

El basamento paleozoico sobre el que evolucionó la secuencia mesozoica de esta región ha sido interpretado como una continuación del cinturón Ouachita del sureste de Estados Unidos. Durante el Triásico y parte del Jurásico ocurrieron los periodos de emersión y fallamiento normal. Estos periodos preparan la Paleogeografía de la parte superior del Mesozoico y dan lugar al depósito de capas rojas continentales que han sido recortadas, sobre todo en y al sur del sector de las sierras transversales Monterrey-Torreón (Zenteno,1984; INEGI, 1990).

Durante el Campanian y Maestrichtiano, continuó la progradación de costa del W hacia el E y las oscilaciones en el fondo marino. En la porción noroccidental de la provincia se establecieron condiciones de plataforma oscilante, de ambientes marinos internos a medios: mientras que en el resto de la provincia las condiciones fueron de mar abierto y de aguas profundas. En el noreste se depositó una potente secuencia arcillosa-arenosa, con intercalaciones variables de cuerpos arenosos de

espesor delgado a medio y con la presencia de capas delgadas de carbón. El ciclo sedimentario del Cretácico Superior en el área Laredo, está representado por una sección arcillo-arenosa de estratificación media a gruesa, de ambientes marinos medios a externos y corresponde al final del ciclo sedimentario del Cretácico y se designa como formación Escondido (Navarro, de León, 1996).

El resto de la provincia de Burgos, en el mismo periodo prevalecieron condiciones de mar abierto y de aguas profundas, en el cual se depositó una potente secuencia calcáreo-arcillosa, de tipo margas, que se denomina formación Méndez, el espesor es variable, dentro de la SMOr, considera un espesor mayor a 550 m, mientras que en el frente de la SMOr se han medido espesores más gruesos, que alcanza aproximadamente 1,900 m (Navarro, de León, 1996; Ibarra Martínez, 2007).

2.6.2 Local

El área de estudio, se ubica dentro de la provincia fisiográfica de Llanura Costera del Golfo de México, donde afloran rocas del Cretácico y sedimentos clásticos de edad Terciaria y edad Cuaternaria. Las formaciones que están presentes son las formaciones "Méndez", "San Felipe" y "Agua Nueva", son rocas de mayor importancia que corresponden a rocas del Cretácico Superior. La formación Méndez está formada por lutitas de color gris verdoso y tiene un espesor aproximado de 150 m. La formación San Felipe, está constituida por estratos de caliza gris verdoso alternadas con capas de lutita gris, con espesor de 95 m. La formación "Agua Nueva", la más antigua de las tres, está constituida por lutitas laminadas de color negro interestratificadas con lutita gris oscuro, en un espesor de 175 m. Estas formaciones sobreyacen a las unidades del Cretácico Inferior, denominadas formaciones: "Cuesta del Cura", "Aurora", "La Peña" y "Cupido", en las cuales predominan las rocas calizas, mismas que están expuestas en el Cerro de la Silla y en la SMOr (Ayala Cruz, 1996).

La refinería "Héctor R. Lara Sosa" se encuentra sobre la Formación Méndez la cual está constituida por Lutitas del Cretácico Superior y por conglomerados del Terciario. El cauce del río Santa Catarina –San Juan está conformado por Aluviones del Cuaternario.

Las lutitas pertenece al grupo de las rocas sedimentarias, está formada por detritos e integrada por partículas del tamaño de la arcilla y el limo, son rocas blandas. El conglomerado también es una roca sedimentaria de tipo detrítico, está formada por cantos rodados y guijarros de otras rocas unidos por un cemento, estos son de diferentes tamaños desde 2 hasta más de 250 mm de espesor. El aluvión es material suelto que es arrastrado y depositado por corrientes de agua superficial, principalmente contienen arena, grava, arcilla o limo (PDUCP, 2015).

2.6.2.1 Geología Estructural

El estudio de la geología estructural en el área de estudio es de vital importancia, esto debido a que se pueden representar las direcciones del flujo del agua subterránea, así como también vías de transporte de contaminantes. Cuando el medio se encuentra fracturado se promueve con mayor rapidez el flujo de contaminantes. Las fracturas ocurren debido a la aplicación de un esfuerzo. El término fractura se utiliza para denominar toda ruptura con o sin desplazamientos, ya sea de roca y/o mineral. Las fracturas son las estructuras más abundantes en la corteza, debido a que se desarrollan en todas las rocas y suelos (Ibarra Martínez, 2007).

Pariendo de lo anterior, en el área de estudio, se tienen afloramientos que presentan fracturas, predominando dos grupos de familias de fracturamiento, del tipo “ac” y tipo “bc”. Las fracturas “ac” se originan durante los procesos de deformación compresionales de la roca y se presentan en forma perpendicular al eje de la estructura. Por otra parte, las fracturas “bc”, se forman en un estado de relajamiento después de la deformación tensional siendo paralelas al eje de las mismas estructuras (Martínez Solís, 2016).

CAPÍTULO 3

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 3 MARCO TEÓRICO

3.1 Geología

Es una rama de las Ciencias Naturales, es la ciencia que estudia la historia, la composición, el origen, los procesos, la formación y la evolución de la Tierra. La Geología incluye métodos y teorías de la química, la física, las matemáticas y la biología. Se apoya en los principios de la química que se refieren a la composición y a la interacción de los materiales y en los principios de la física para tratar de entender las leyes de la energía y la estructura atómica (Iriundo, M., 2007).

La Geología se divide generalmente en dos partes: externa e interna. La geología externa se ocupa de estudiar los materiales que forman la corteza terrestre y los procesos de la capa atmosférica y de la biosfera que influye sobre ella. Mientras que la geología interna estudia los procesos que se desarrollan bajo la corteza terrestre y las causas que lo producen. A su vez, tradicionalmente la geología externa se ha dividido en dos amplias áreas: la física y la histórica. La geología física, estudia los materiales que componen la tierra y busca comprender los diferentes procesos que actúan debajo y encima de la superficie terrestre. Mientras que la Geología histórica tiene como objetivo conocer el origen de la Tierra y su evolución a lo largo del tiempo (Tarbuck *et. al.*, 2005).

La geología tiene como objetivo entender la evolución del planeta y sus habitantes, desde sus inicios hasta la actualidad, todo esto mediante el análisis de rocas. La geología analiza el desarrollo espacial y temporal para señalar los factores y fuerzas que participaron en un determinado proceso y que han dado forma a lo que actualmente conocemos.

3.1.1 Formación de las 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 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 se pueden formar cuando una corriente produce erosión en la vertical a través de

un aluvión previamente depositado. Esto puede producirse en respuesta a un descenso del nivel de base o como consecuencia de un levantamiento regional (Tarbuck *et. al.*, 2005). Las terrazas aportan las características geomorfológicas para conocer la tectónica, el nivel del mar y las condiciones climáticas durante la historia evolutiva de un río.

La velocidad a la que viaja una corriente es llamada velocidad de corriente, esta tiene un papel muy importante en la formación de terrazas, ya que es un parámetro que afecta la erosión y depositación de sedimentos en el cauce del río. A su vez, la velocidad es controlada por el gradiente de la corriente, la forma del cauce, y la rugosidad del mismo. Un río moderadamente rápido fluye alrededor de 5 km/h. Los ríos fluyen mucho más rápido durante las inundaciones, excediendo algunas veces a los 25 km/h. A mayor velocidad se genera mayor erosión y transporte de sedimentos; por el contrario, a menor velocidad ocurre la depositación de sedimentos (De León Gutiérrez, 1999; Martínez Quiroga, 2018).

Las terrazas pueden clasificarse generalmente en base de su topografía. Las terrazas son comúnmente clasificadas como pares o impares como se observa en la Figura 7. Las terrazas pares son las que se encuentran a la misma elevación a cada lado de un río. Si la elevación de las terrazas difiere de un lado del río al otro, estas son impares, normalmente formándose por la simultánea erosión lateral y vertical (De León Gutiérrez, 1999; Miller y Orbock Miller, 2007; Martínez Quiroga, 2018).

Las terrazas pares se forman cuando un río corta hacia abajo dentro de una espesa secuencia de sus mismos depósitos de la planicie de inundación. Posteriormente el río puede cambiar de depositación a erosión y cortar dentro de su planicie de inundación, partes de la cual permanece como terraza sobre el río. Las terrazas pares pueden también desarrollarse a partir de la erosión del piso del lecho del río. Las terrazas impares son terrazas de distinta elevación que se encuentran en los lados opuestos de un río. Un río que está cortando hacia abajo y erosionando lateralmente, al mismo tiempo se retrae y avanza a lo largo de su valle mientras corta hacia abajo. Este movimiento puede cortar una serie de bancos de roca o

terrazza a niveles progresivamente más bajos en cada lado de un valle (De León Gutiérrez, 1999)

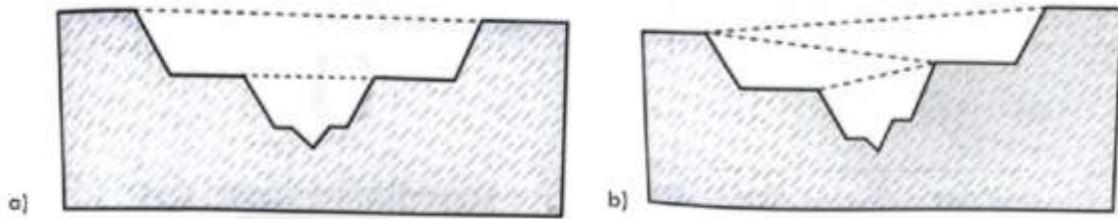


Figura 7. Terrazas clasificadas acorde a la topografía: a) terrazas pares b) terrazas impares (Martínez Quiroga 2018).

3.2 Hidrología

La hidrología es el estudio del agua. En el sentido más amplio, la hidrología aborda la ocurrencia, distribución, movimiento y química de toda el agua de la tierra (Fetter, 2001).

Según Dongman (1994), la hidrología es la ciencia que se enfoca al ciclo hidrológico global y a los procesos involucrados en la parte continental de dicho ciclo. Es la geociencia que describe y predice: las variaciones espaciales y temporales del agua en las etapas terrestres, oceánicas y atmosféricas del sistema hídrico global y el movimiento del agua sobre y debajo de la superficie terrestre, incluyendo los procesos químicos, físicos y biológicos que tiene lugar a lo largo de su trayectoria.

3.2.1 Ciclo hidrológico

El agua puede cambiar rápidamente de un estado de materia a otro ya sea de líquido a sólido o a gaseoso, el agua está sometida a una dinámica impulsada principalmente por las energías térmicas del Sol y del interior de la Tierra, que hacen que este en continuo movimiento. Por consiguiente, el agua se está moviendo constantemente entre la hidrosfera, la atmósfera, la tierra sólida y la biosfera, esta interminable circulación es conocido como ciclo hidrológico (Delgado *et. al.*, 2005; Tarbuck *et. al.*, 2005).

El ciclo hidrológico es la transferencia de agua en distintas etapas (Véase Figura 8), se destacan fases básicas de interés: precipitación, infiltración, escorrentía, evaporación y transpiración. El ciclo del agua cambia de estado constantemente.

Partiendo de la evaporación del agua, que en su ascenso a la atmósfera se condensa, cuando se alcanza un gran número de partículas de agua condensada y el peso es mayor al que se puede soportar ocurre la precipitación. Pero una porción de la precipitación no llega a tocar la tierra, debido a que se evapora en el proceso, la precipitación que cae en el océano ha completado su ciclo y está dispuesta a empezar otro. El agua que cae en tierra puede presentar dos procesos, el primero es la infiltración en el suelo y el segundo es el escurrimiento, este último se da porque la lluvia es mayor a la capacidad del suelo para absorberla, y el agua fluye llegando a ríos, lagos o directamente en el océano. La reincorporación del agua a la atmósfera ocurre mediante el proceso de evaporación y transpiración, o la unión de los dos mediante la evapotranspiración (Aranda,1987; Werner, 1996; Fetter, 2001; Tarbuck *et. al.*, 2005).

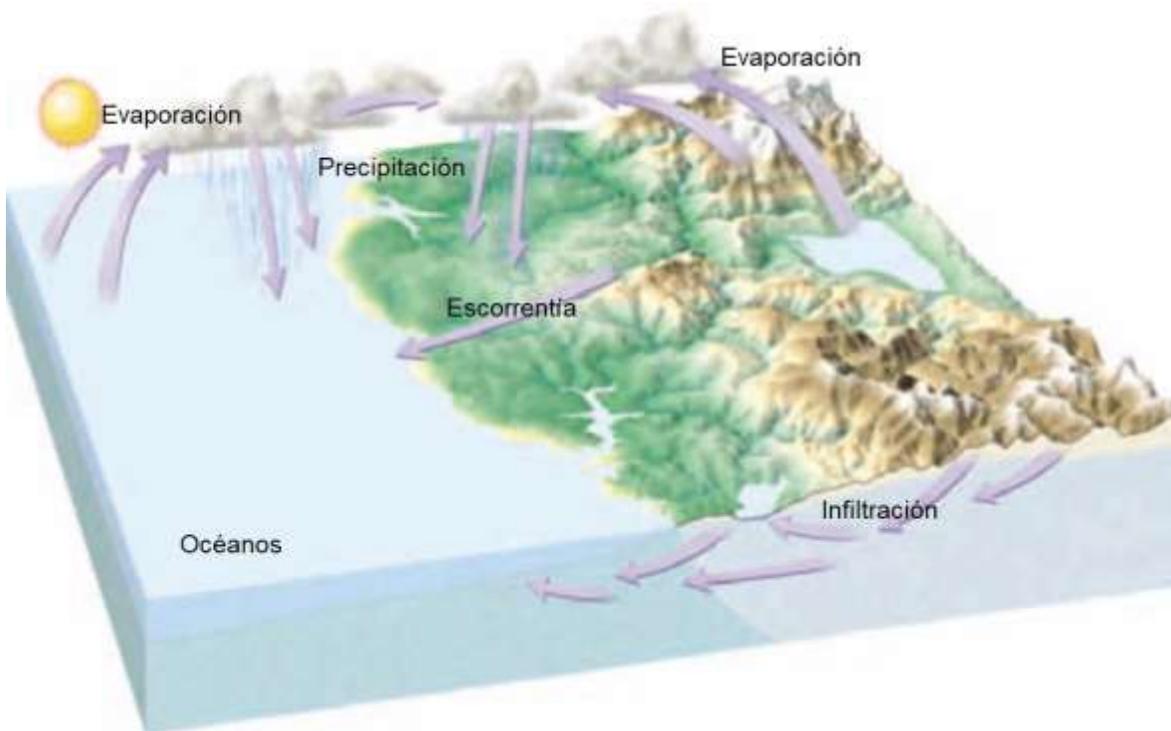


Figura 8. Etapas del Ciclo hidrológico (Tarbuck *et. al.*, 2005).

3.3 Hidrogeología

3.3.1 Acuífero

El acuífero es el medio rocoso o formación geológica que permite la circulación del agua por sus poros o grietas. 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 Acuíferos

Existe diferentes clasificaciones de las formaciones geológicas(acuíferos) que varían de acuerdo a su composición geológica, su hidrogeología y su comportamiento hidrodinámico. Sin embargo, los más comunes son de acuerdo a su composición geológica (litología) y su comportamiento hidrodinámico.

Según Werner, 1996, la clasificación de acuerdo a su litología, existen tres tipos principales, que van en función del tipo de porosidad (Véase Figura 9).

Acuíferos de poros: El agua se mueve en los poros (intersticios).

Acuíferos de grietas: El agua se mueve en las fracturas abiertas de origen tectónico o de intemperismo. El contenido de poros generalmente es despreciable.

Acuíferos Kársticos: El agua se mueve en los huecos cársticos de diámetros muy variables (canales, cavernas). El contenido de poros es despreciable.

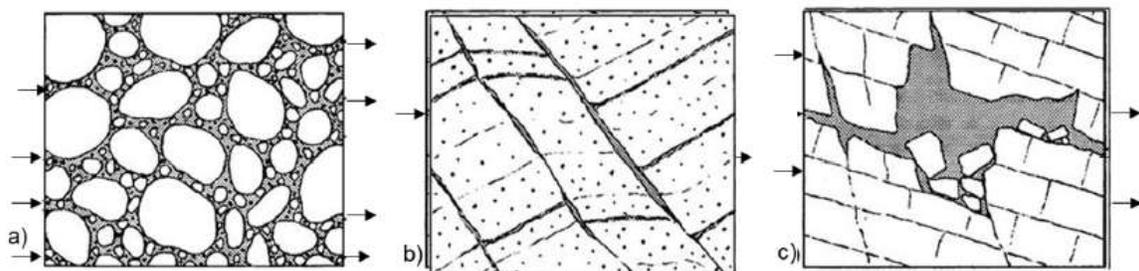


Figura 9. a) Acuífero de poros, en su mayor parte se trata de sedimentos sueltos (gravas, arenas). b) Acuífero de grietas, rocas consolidadas como areniscas, calizas no carstificadas, basaltos, granitos u otras rocas extrusivas e intrusivas, gneisses. c) Acuífero kárstico, rocas cárstificadas (calizas, dolomías, yeso) (Modificado de Werner, 1996).

Según Custodio & Llamas (1996); Werner (1996), la clasificación por sus características hidrodinámicas es (Véase Figuras 10 y 11):

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.

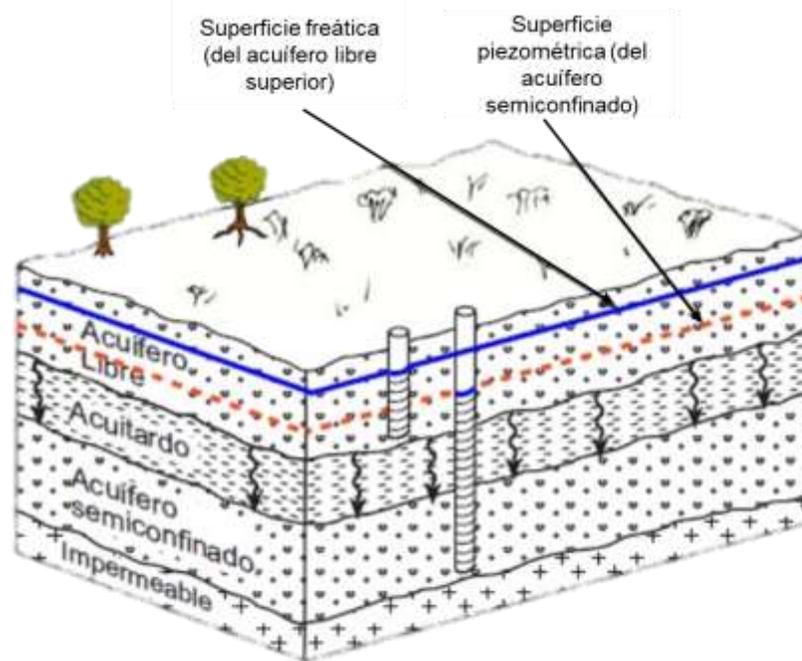


Figura 10. Acuífero Libre y Semiconfinado (Núñez Mejía, 2019).

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.

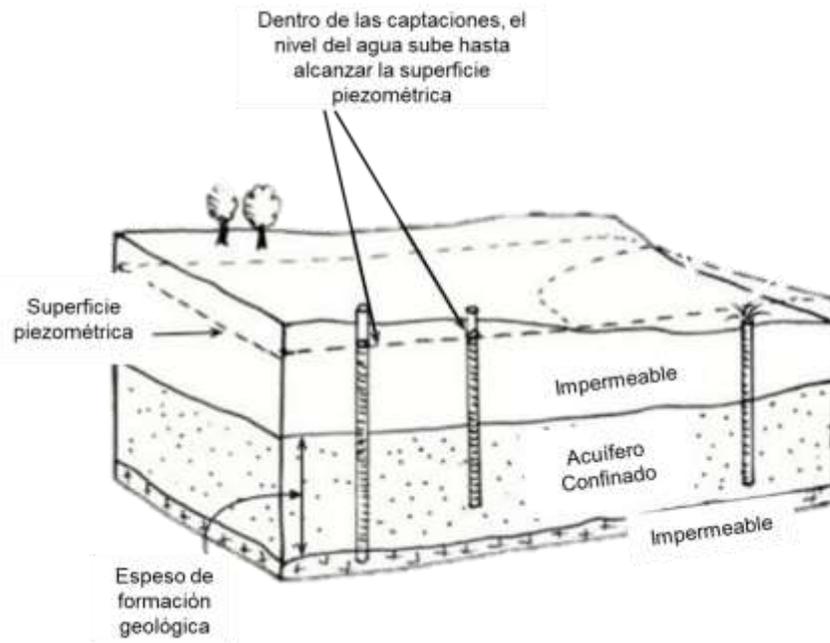


Figura 11. Acuífero Confinado (Núñez Mejía, 2019).

3.4 Hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica se ocupa de la calidad química del agua subterránea, es una ciencia multidisciplinaria que relaciona la composición química del agua con los procesos y reacciones que se producen en el ambiente subterráneo. Las investigaciones hidrogeoquímicas proporcionan conocimientos acerca del origen de las aguas subterráneas y ayudan a entender el funcionamiento de sistemas de flujo de las mismas. Es importante conocer los procesos físicos, químicos y microbiológicos que ocurren en los acuíferos, ya que pueden ayudar a solucionar los problemas relacionados con la calidad y uso del agua subterránea (Werner 1996; Díaz Delgado, *et. al.*, 2005).

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, la desidia, la ignorancia y, principalmente, por la falta de un adecuado control en la gestión del agua subterránea (Custodio & Llamas, 1983).

Un punto importante en los estudios hidrogeoquímicos es la evaluación de la contaminación del agua. Las aguas superficiales están sometidas a contaminación natural (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, 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; Lozada, *et. al.*, 2009).

3.4.1 Petróleo (Aceite fósil)

El petróleo es un líquido inflamable, de origen natural. La palabra petróleo proviene del latín “petra” y “óleum”, que significa piedra de aceite. Generalmente, cualquier mezcla de hidrocarburos que se puede producir a través de una tubería se denomina petróleo. El petróleo en la naturaleza se encuentra esencialmente en los siguientes estados: Como gas natural, como condensado, como crudo y como mene (Hunt, 1996).

Químicamente, el petróleo se define como una mezcla de hidrocarburos saturados e hidrocarburos aromáticos, así como de compuestos químicos heteroatómicos que contienen azufre, nitrógeno, oxígeno y metales traza de alto peso molecular (llamadas resinas y asfaltenos), (norma ASTM D-6560).

3.4.2 Hidrocarburos

Los hidrocarburos son compuestos por átomos de carbono e hidrógeno. Donde el carbono es el único átomo capaz de unirse entre sí para formar cadenas lineales, ramificadas, abiertas o cerradas.

Una clasificación general de los hidrocarburos se muestra en la Figura 12.

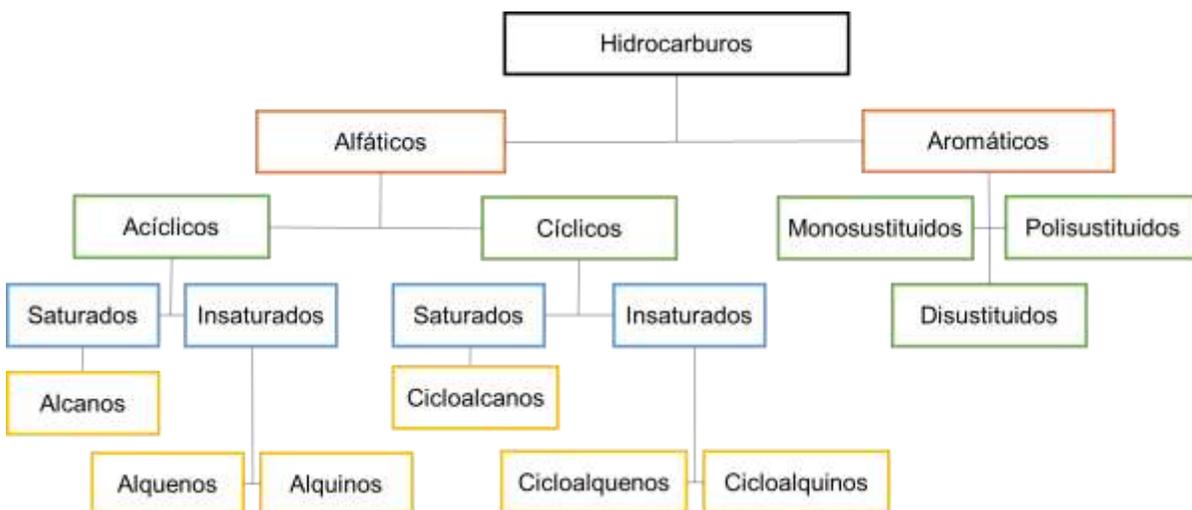


Figura 12. Clasificación de hidrocarburos (Morales, C., 2017)

Los hidrocarburos alifáticos se dividen en dos, en cadena abierta o en cadena cerrada. Los hidrocarburos de cadena abierta dependiendo de su grado de saturación, son clasificados como alcanos (o parafinas), alquenos y alquinos. Estos presentan un tipo de hibridación sp^3 , sp^2 , sp , es decir, enlace simple, doble y triple, que forman un ángulo entre sus enlaces de 109° , 120° y 180° , respectivamente. Mientras que los de cadena cerrada se dividen en cicloalcanos, cicloalquenos y cicloalquinos (Morales, C., 2017).

Los hidrocarburos aromáticos son aquellos que en su estructura poseen por lo menos un anillo bencénico. Constituyen un grupo especial de compuestos cíclicos que contienen en general anillos de seis átomos de carbono y en los cuales se alternan enlaces sencillos y dobles (Morales, C., 2017; Animas, G. *et. al.*, 2017).

Los hidrocarburos y sus derivados siguen siendo una de las principales fuentes de energía para el ser humano, a su vez la contaminación por hidrocarburos ha ido en aumento en las últimas décadas, provocado serias preocupaciones ambientales, debido al impacto que generan en los ecosistemas y en la salud. La degradación ambiental se ha presentado como el resultado de la extracción y/o refinación de hidrocarburos. La contaminación por éstos tiene implicaciones de gran alcance,

tanto para los ecosistemas terrestres y acuáticos como para la atmósfera (Anejionu *et. al.*, 2015; Zhang *et. al.*, 2015; Sun *et. al.*, 2018).

Los hidrocarburos y sus derivados al derramarse en ambientes terrestres dañan la composición de los suelos. Algunos derivados de hidrocarburos como la gasolina, diésel, lubricantes, queroseno, aceites, combustibles, parafinas, y el asfalto, además de impactar en la capa superficial del suelo, también corren el riesgo de infiltrarse hasta el agua subterránea generando así su contaminación, o incluso pueden ser transportados por escorrentía incrementando aún más el daño ambiental. Dicha contaminación afecta las condiciones fisicoquímicas del 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 composición de nutrientes, dañando significativamente la calidad del agua. 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 (Arias, 2017; Rosell-Melé *et. al.*, 2018).

3.4.3 Benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX).

La contaminación del agua es uno de los principales problemas ambientales, en los últimos años ha aumentado la contaminación del agua por hidrocarburos y sus derivados. Se tiene un particular interés en el tratamiento de agua contaminada por una mezcla llamada BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno), esta contaminación está asociada a actividades de las refinerías de petróleo. El agua y la salud son dos aliados estratégicos que contribuyen al sostenimiento y a la calidad de la vida (Montanez, Aleyda *et. al.*, 2009; Cordova Estrada, *et. al.*, 2019).

Los BTEX son compuestos orgánicos volátiles pertenecientes a la familia de los hidrocarburos aromáticos, estos están formados por un anillo monocromático que, debido a su polaridad y características muy solubles, son contaminantes del agua superficial y subterránea, a su vez son contaminantes prioritarios del agua potable. El grupo BTEX se deriva principalmente en la combustión del carbón, petróleo crudo

y alquitrán (ATSDR, 1999; Cordova Estrada, *et. al.*, 2019; Lacasaña Navarro, *et. al.*, 2008).

Durante la extracción, distribución y refinación de petróleo cantidades significativas de estos compuestos y otros derivados entran al agua. La gasolina es uno de los productos del petróleo que se encuentra con mucha frecuencia contaminando el suelo y las aguas subterráneas, sus componentes principales son los compuestos orgánicos volátiles BTEX lo que representan una fuente de contaminación a largo plazo. A su vez, el benceno es uno de los compuestos de la gasolina más estudiado ya que se utiliza como antidetonante. Aunque el tolueno, el etilbenceno, el m/p-xileno y el orto-xileno no son carcinógenos, por lo general se estudian junto con el benceno debido a sus estructuras químicas similares y a que comparten las mismas fuentes de exposición (López Herrera, 2017).

- **Benceno**

El benceno es un líquido claro, transparente e incoloro, en concentraciones bajas tiene un olor dulce, y es irritable en niveles altos, es altamente inflamable. Algunos sinónimos del benceno son: nafta de carbón, ciclohecatreno, nafta mineral, probenzol y por nombre comercial Polystream.

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, estima 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 / litro (el nivel más alto reportó 80 µg / litro) para abastecimientos de agua potable.

- **Tolueno**

El tolueno es un líquido orgánico incoloro, no corrosivo e inflamable con un olor similar al del benceno. El umbral de olor del tolueno oscila entre 2,5 y 8 ppm y es irritante a 750 ppm.

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).

- **Etilbenceno**

El etilbenceno es un líquido orgánico incoloro con un suave olor a gasolina, es inflamable como líquido o vapor, tiene una solubilidad muy baja en agua y se mezcla bien con la mayoría de los disolventes orgánicos. Algunas fuentes de origen son aguas residuales, derrames de su producción o uso industrial y la refinación del petróleo, todo esto genera un impacto en el suelo y en el agua tanto superficial como subterránea (Escobar, C., 2003; U.S. EPA., 2013).

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).

- **Xileno**

El xileno tiene tres isómeros, orto - 1,2-dimetilbenceno u o-xileno; meta - 1,3-dimetilbenceno o m-xileno; y para - 1,4-dimetilbenceno o p-xileno. El xileno de

calidad comercial suele ser una mezcla de isómeros, que es predominantemente m-xileno (hasta un 60%) con niveles aproximadamente iguales de o- y p-xileno (20% cada uno). El xileno es depositado en el ambiente por distintas vías, ya sea por emisiones de la refinación de petróleo, motores diésel y de gasolina; o por emisiones de este cuando es utilizado como solvente para resinas, pegantes, pesticidas y en la síntesis orgánica (Escobar, C., 2003; U.S. EPA., 2013).

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).

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA

En la Figura 13, se puede observar, de manera general, el esquema metodológico propuesto, que en el presente capítulo se detalla con mayor precisión.

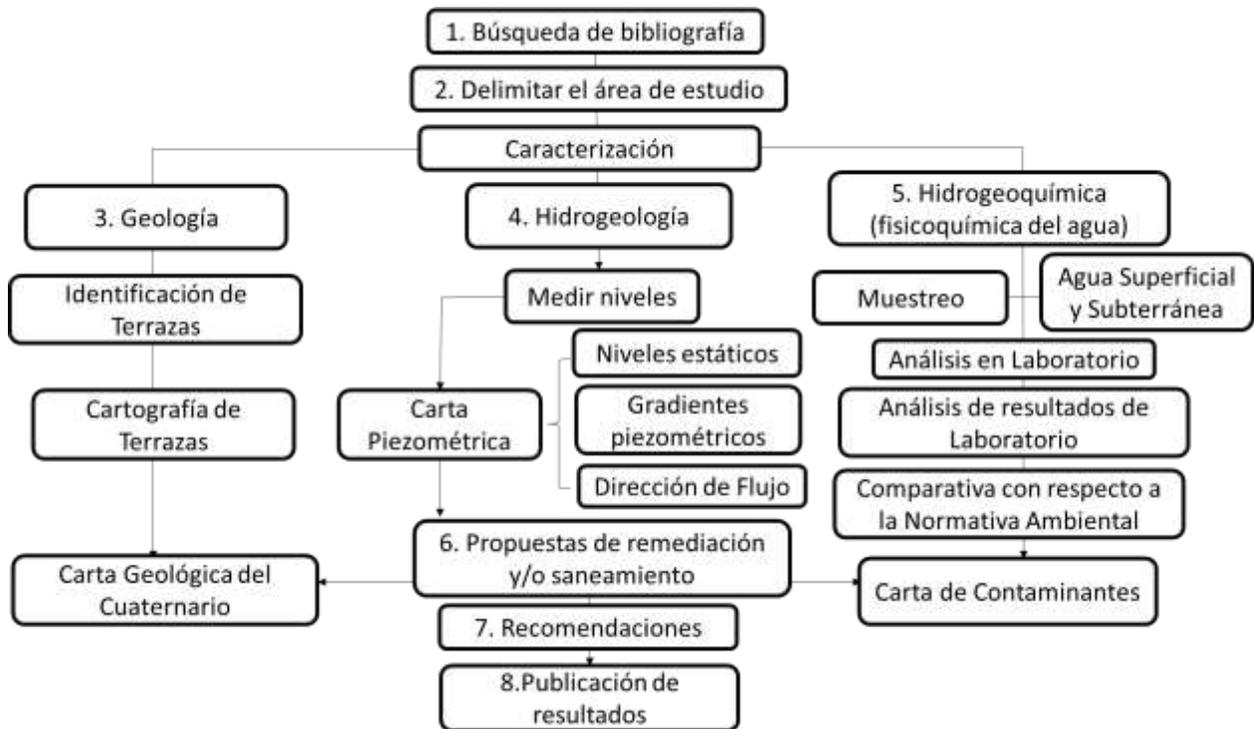


Figura 13. Esquema metodológico propuesto general.

4.1 Caracterización Geológica

Las terrazas fueron identificadas utilizando el esquema metodológico de la Figura 14, en el cual se utilizaron los datos cartográficos con la geología de la zona mediante una carta geológica de la zona y recorridos de campo. Se realizaron levantamientos aéreos y los productos resultantes (ortomosaicos y modelos digitales de terreno) en conjunto con otros MDE más extensivos que abarcan el área de estudio completa. Véase a continuación una descripción con mayor detalle.

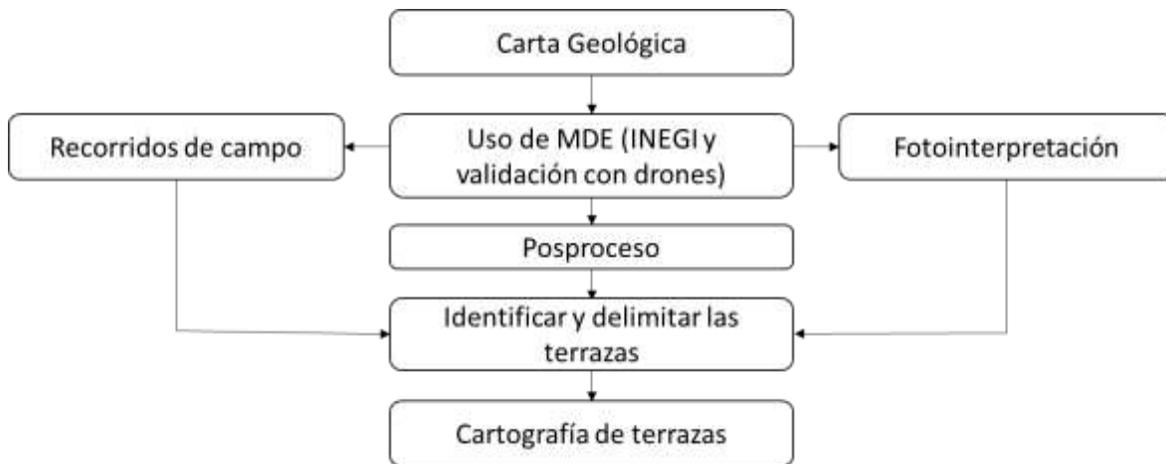


Figura 14. Esquema metodológico, cartografía de terrazas.

4.1.2 Carta Geológica

Mediante el uso e interpretación de la carta geológica G14-8 a escala 1:250,000 obtenida del Servicio Geológico Mexicano (2000), se realizó la caracterización geológica de área de estudio. Para delimitar el área de estudio, se consideró la ubicación de los aprovechamientos hidráulicos cercanos a la refinería “Héctor R. Lara Sosa”, y una sección de aproximadamente 10 km lineales sobre el cauce del río. El área de estudio en su totalidad cubre 4 hectáreas.

El proceso de interpretación y reconocimiento es importante desde el punto geológico, debido a que con la ubicación de los vectores correspondientes a la zona se puede saber cómo se formaron las rocas, cómo fue que evolucionaron y de los procesos geológicos que se fueron presentando. En este proceso se invierte tiempo en gabinete reconociendo el área y después realizando recorridos de campo con carta en mano.

4.1.3 Recorridos de campo

Durante esta etapa del trabajo de investigación se identificó en campo las terrazas a lo largo del área de estudio. Se documentó la composición actual de cada terraza y fueron localizados los puntos en los que afloran las formaciones geológicas. Las terrazas se identificaron en base a su posición topográfica, espesor, litología y edad, clasificándolas en tres niveles de evolución terraza 1, 2, o 3 (Véase Figura 15) y sedimentos finos y sedimentos aluviales.



*Figura 15. Conglomerado de la T1 (Coordenadas 406843E; 2828649 N)
e identificación de Terraza 3 (Coordenadas 404566E; 2826934 N).*

4.1.4 Uso de modelos digitales de terreno

La metodología consistió en seleccionar cuatro sitios distribuidos equitativamente a lo largo de los 10 km del cauce del río San Juan pertenecientes al área de estudio.

En gabinete se diseñó un plan de vuelo para cada polígono, utilizando una versión gratuita de la aplicación *DroneDeploy*. La programación del vuelo que se llevó a cabo fue “*Crosshatch*” el cual permite tener una cobertura más completa. Todos los vuelos fueron programados a una altura de 100 m. El modelo de dron utilizado fue *DJI Phantom 4 Pro*, con el cual se obtuvieron imágenes aéreas de mejor resolución que las imágenes satelitales.

En campo se obtuvieron las fotografías aéreas de acuerdo al plan de vuelo (Véase Figura 16), y se almacenaron en una memoria para después ser procesadas. Del posproceso se obtuvieron los ortomosaicos, y la nube de puntos, la cual fue previamente clasificada para separar terreno y no terreno, exportando finalmente los modelos digitales de terreno (MDT). Los MDT obtenidos con el dron sirvieron para validar el proceso de identificación de terrazas que se hizo utilizando de manera extensiva los MDE del INEGI, los cuales al tener un tamaño de pixel 5m representan información más gruesa (MDE de INEGI= 5 m vs MDT de dron= 3 cm).



Figura 16. Vuelo del dron PHANTOM 4 PRO.

4.1.5 Fotointerpretación

La fotointerpretación consistió en identificar las diferentes terrazas mediante *Google Earth*. Para diferenciar una terraza de otra, nos basamos en observar los cambios en la topografía y en la vegetación en las diferentes áreas. Para esto se delimitaron las zonas de terrazas por medio de la creación de polígonos, estos se agruparon en carpetas en una base de datos de *Google Earth*.

A la par en el programa *ArcGis 10.3*, se cargaron los datos del MDE del INEGI y los ortomosaicos. Partiendo del MDE del INEGI se crearon las curvas de nivel y por último se realizó un análisis del terreno mediante el uso de las herramientas *slope* y *aspect*, la primera permitió obtener las pendientes del terreno y la segunda permitió observar la dirección del terreno. Posteriormente, se pasaron los archivos de los polígonos creados en la base de *Google Earth* en formato KML a polígono mediante la herramienta “*KML to Layer*”.

Para obtener la Carta Geológica, se tomó en cuenta la topografía y vegetación que observamos en *Google Earth*. En conjunto con el modelo digital de terreno, el modelo continuo de elevación mexicano y el análisis de terreno obtenido en *ArcGis 10.3*.

4.2 Caracterización Hidrogeológica

4.2.1 Aprovechamientos hidráulicos

Se utilizó como apoyo el programa informático *Google Earth*, el cual está basado en imágenes satelitales, mediante el programa se visualizó el área de estudio para ubicar posibles sitios de muestreo. Posteriormente, se realizó un recorrido en campo en los alrededores de la refinería “Héctor R. Lara Sosa” el cual consistió en ubicar, identificar, clasificar y seleccionar los distintos aprovechamientos hidráulicos más cercanos a la refinería. Cabe destacar que los aprovechamientos se dividieron en pozos, norias (agua subterránea), canales de agua y puntos en el cauce del río (agua superficial). En la Tabla 1, se muestran los datos generales, se localizaron 6 pozos (PR-1 a PR-6) y dos norias (PR-7 y PR-8). AR-1 y AR-2 son canales de agua, AC-1 (Ini), AC-1 (Int) y AC-2 (Fin) son puntos que se tomaron en el cauce del río. En la Tabla 2, se muestra las características de los aprovechamientos hidráulicos.

Tabla 1. Clasificación de los aprovechamientos hidráulicos.

ID	Tipo	Clave del pozo	Nombre para identificarlo
1	Subterránea	PR-1	Talud (Punto de control Inicial)
2		PR-2	Motel
3		PR-3	Rancho "El señor"
4		PR-4	Tubo blanco
5		PR-5	Fraccionamiento
6		PR-6	Pozo antiguo
7		PR-7	Noria Lupita
8		PR-8	Noria Rancho San Gerardo
9	Superficial	AR-1	Arroyo-Vaquitas
10		AR-2	Arroyo-COV
11		AC-1 (Ini)	Puente del Río (Punto de control inicio)
12		AC-1 (Int)	Puente del Río (Punto de control intermedio)
13		AC-2 (Fin)	Puente del Río -Árboles secos (Punto de control final)

Tabla 2. Aprovechamientos hidráulicos localizados en el área de estudio.

 <p>Clave: PR-1 Fecha de identificación: 20/Sep/2019 Activo: No Clasificación: Subterránea Aprovechamiento Hidráulico: Pozo Observaciones: Agua muy turbia.</p>	 <p>Clave: PR-2 Fecha de identificación: 20/Sep/2019 Activo: No Clasificación: Subterránea Aprovechamiento Hidráulico: Pozo Observaciones: Color del agua rosita, agua turbia.</p>
 <p>Clave: PR-3 Fecha de identificación: 20/Sep/2019 Activo: Si Clasificación: Subterránea Aprovechamiento Hidráulico: Pozo Observaciones: Color del agua blanco lechoso.</p>	 <p>Clave: PR-4 Fecha de identificación: 20/Sep/2019 Activo: S Clasificación: Subterránea Aprovechamiento Hidráulico: Pozo Observaciones: Presenta poco color y olor.</p>



Clave: PR-5
Fecha de identificación: 20/Sep/2019
Activo: No
Clasificación: Subterránea
Aprovechamiento Hidráulico: Pozo
Observaciones: Pozo sin equipar, 10" diámetro, olor a Azufre.



Clave: PR-6
Fecha de identificación: 20/Sep/2019
Activo: No
Clasificación: Subterránea
Aprovechamiento Hidráulico: Pozo
Observaciones: Pozo antiguo, 12" diámetro, funcionaba con diésel, tenía bomba de cabezal. Presentó un color amarillo claro y olor a gasolina.



Clave: PR-7
Fecha de identificación: 20/Sep/2019
Activo: No
Clasificación: Subterránea
Aprovechamiento Hidráulico: Noria
Observaciones: Medición en el techo de la noria. Ubicada muy cerca del río.



Clave: PR-8
Fecha de identificación: 20/Sep/2019
Activo: No
Clasificación: Subterránea
Aprovechamiento Hidráulico: Pozo
Observaciones: En la parte superior se encontró aceite.



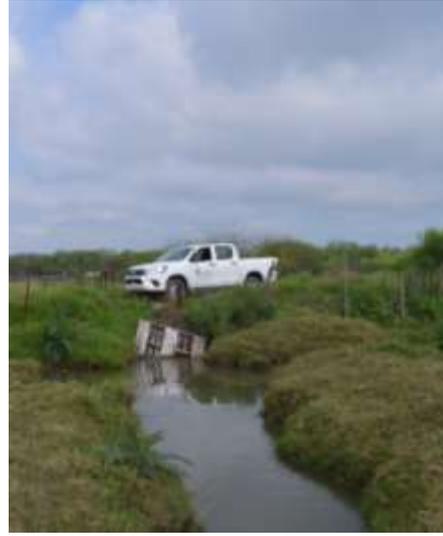
Clave: AR-1

Fecha de identificación: 20/Sep/2019

Clasificación: Superficial

Aprovechamiento Hidráulico: Canal de descarga de hidrocarburos.

Observaciones: Olores a hidrocarburos, color anómalo.



Clave: AR-2

Fecha de identificación: 20/Sep/2019

Clasificación: Superficial

Aprovechamiento Hidráulico: Canal de descarga de hidrocarburos.

Observaciones: Olores a hidrocarburos, color anómalo.



Clave: AC-1

Fecha de identificación: 20/Sep/2019

Clasificación: Superficial

Aprovechamiento Hidráulico: Cauce del Río Santa Catarina

Observaciones: Muestra tomada del río, aguas arriba.



Clave: AC-2

Fecha de identificación: 20/Sep/2019

Clasificación: Superficial

Aprovechamiento Hidráulico: Cauce del Río Santa Catarina

Observaciones: Muestra tomada del río, aguas abajo.

En la Figura 17, se muestra el mapa con la localización de cada uno de los diferentes aprovechamientos hidráulicos.

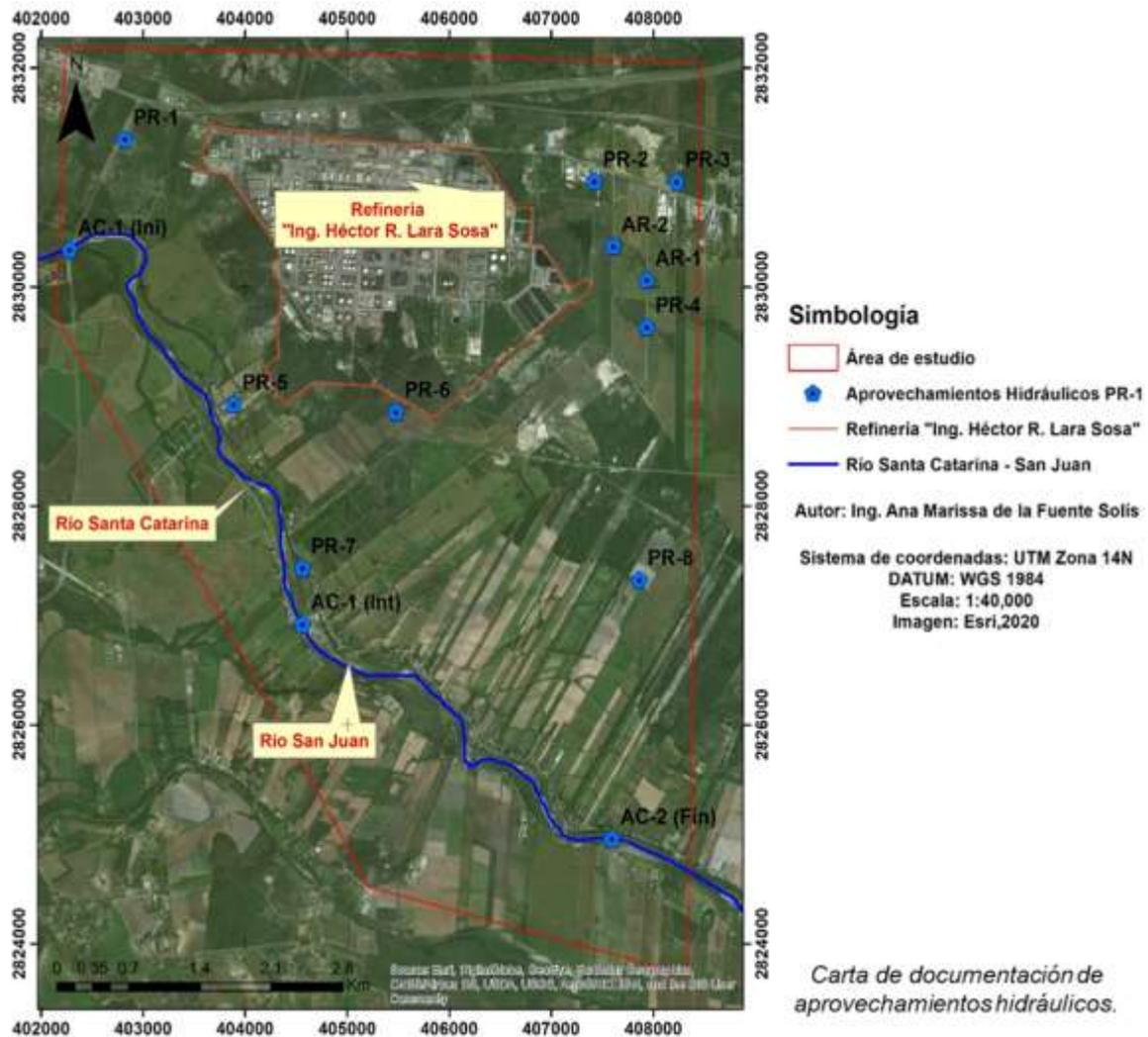


Figura 17. Localización de los diferentes aprovechamientos hidráulicos.

4.2.1 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 la carta, primero se realizó un recorrido para determinar los diferentes aprovechamientos hidráulico más próximos a la zona de la refinería “Héctor R. Lara Sosa”. Después de la clasificación de los aprovechamientos hidráulicos, se seleccionaron 6 pozos y 2 norias.

Para realizar una carta piezométrica es necesario conocer los niveles estáticos del agua y la elevación del terreno (msnm). Se utilizó una sonda acústica (*Solinst*) para medir los niveles estáticos del agua (Figura 18 y 19). El procedimiento consistió en introducir la sonda en los aprovechamientos hidráulicos, está cuenta con un electrodo en la parte superior el cual al tocar el agua emite una señal al detector. Primeramente, la sonda se encendió y se procedió a bajar el cable cuidadosamente por la tubería del pozo, evitando tocar las paredes del pozo. El cable se detuvo hasta que la sonda emitió un sonido que indicaba la presencia de agua y este valor es el que se considera como el nivel estático (Véase Figura 18).



Figura 18. Medición del nivel estático.

La geoposición (UTM) y los niveles con respecto al nivel del mar se determinaron con un sistema de geoposición geográfica (GPS marca GARMIN), esto último se verifico con un archivo LIDAR (Véase Figura 19).



Figura 19. Equipo necesario para la medición del nivel estático.

La Tabla 3, muestra la información necesaria para la elaboración de la carta piezométrica.

Tabla 3. Aprovechamientos hidráulicos con sus respectivas coordenadas, elevación del terreno, niveles estáticos y niveles piezométricos obtenidos (2019). Valores correspondientes a la carta piezométrica octubre del 2019.

ID	Clave del pozo	Coordenadas UTM (m E) (m N)	Nivel estático (m)	Altura del brocal (msnm)	Nivel piezométrico (msnm)
1	PR-1	0402820 2831350	18.68	330	311.32
2	PR-2	0407422 2830964	24.47	311	286.53
3	PR-3	0408230 2830963	25.64	311	285.36
4	PR-4	0407937 2829632	6.72	296	289.28
5	PR-5	0403888 2828926	9.4	301	291.6
6	PR-6	0405478 2828858	9.86	304	294.14
7	PR-7	0404561 2827430	6.87	300	293.13
8	PR-8	0407864 2827324	3.38	290	286.62

Para la elaboración de la carta piezométrica, se utilizaron los valores obtenidos en campo de la elevación del terreno (msnm) y de los niveles estáticos. El nivel piezométrico de cada pozo se calcula a partir de la diferencia de la elevación del nivel del terreno y el nivel estático.

Partiendo de los niveles piezométricos se aplicó la metodología del triángulo hidrológico, que consta en la interpolación lineal de los niveles piezométricos entre dos puntos de diferente elevación, que se van ligando con puntos adyacentes, lo cual permite el trazo de las curvas piezométricas y así obtener la carta piezométrica (Werner, 1996).

Para la carta digital se utilizó el método de interpolación *Kriging*, transfiriendo los datos piezométricos y de ubicación de cada pozo al programa ArcMap 10.3, a partir del cual se generó la interpolación y se generaron las isolíneas piezométricas a partir de ésta, a cada con la herramienta “*Contour*”. Finalmente se dibujaron las líneas representativas de la red de flujo del agua subterránea. Se elaboraron tres cartas piezométricas correspondientes a los meses de octubre y noviembre del 2019 y agosto del 2020.

4.3 Caracterización Físicoquímica del Agua

Para conocer la naturaleza del agua en el área de estudio, se realizaron análisis físicoquímicos en los 8 puntos de agua subterránea y 4 de agua superficial, además del estudio de la posible afectación por la actividad antropogénica particularmente de hidrocarburos aromáticos como Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno (BTEX) presentes en los procesos de refinación de petróleo. Durante el desarrollo del trabajo experimental se realizaron dos campañas de muestreo para los estudios antes mencionados tomando las normas mexicanas. Todo el muestro se realizó 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".

Para realizar los muestreos de agua se fabricaron muestreadores artesanales, los cuales están hechos de tubo PVC de un diámetro de 1 ½ “y de 2 “, se les acopló unos arneses y una cuerda para poder introducirlos en los distintos aprovechamientos hidráulicos (Véase Figura 20).



Figura 20. Muestreadores de agua utilizados.

4.3.1 Análisis fisicoquímicos del agua

En los diferentes aprovechamientos hidráulicos se tomaron muestras de agua (Véase Figura 21), lo que permitió realizar análisis fisicoquímicos (Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno, Fosfatos, Alcalinidad, Sólidos Totales (ST), Sólidos Totales Volátiles (STV), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) en laboratorio para determinar las características químicas del agua.



Figura 21. Muestras de agua para análisis en Laboratorio.

A continuación, se describe cada uno de los parámetros.

4.3.1.1 Agua subterránea

4.3.1.1.1 Potencial de Hidrógeno (pH)

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^+) (Zamora, J., 2009).

Para el caso de este trabajo se realizó la medición de pH de las 8 muestras de agua subterránea *in-situ*, empleando unas tiras de prueba de pH (marca Hydron) y luego al llegar al laboratorio se volvió a medir utilizando un potenciómetro (*Modelo "Orion", marca Thermo Scientific*) mediante los procedimientos establecidos en la norma NMX-AA-008-SCFI-2016.

4.3.1.1.2 Temperatura

La medición de la temperatura es importante para realizar un diagnóstico más certero sobre la evolución hidrogeoquímica en las muestras de agua subterránea. Para este trabajo se realizó la medición de la temperatura *in-situ* en las 8 muestras de agua subterránea mediante una sonda acústica (Marca Solinst). Esta misma acción se repitió en el laboratorio empleando un termómetro de la marca en el intervalo de -20 a 150°C (Kessler Thermometer).

4.3.1.1.3 Conductividad

La conductividad es la capacidad de una solución para conducir la corriente de agua, y aumenta con la concentración iónica (cationes). Para el caso de las muestras de agua subterráneas de este estudio, la conductividad permitirá estimar la mineralización del agua como resultado de los procesos biogeoquímico que tienen lugar en la zona de estudio.

Las mediciones de conductividad en los 8 puntos de muestreo se realizaron *in-situ* utilizando una sonda acústica (Marca Solinst, Modelo 101).

4.3.1.1.4 Fosfatos

La determinación de Fósforo en las 8 muestras de agua subterránea se realizó de acuerdo a la NMX-AA-029-SCFI-2001, utilizando el método ácido vanadomolibdofosfórico. A continuación, se describe el procedimiento empleado.

En una disolución diluida de ortofosfatos, el molibdato de amonio reacciona en condiciones ácidas con el vanadato para formar un heteropoliácido, ácido vanadomolibdofosfórico. En la presencia de vanadio, se forma ácido vanadomolibdofosfórico de color amarillo. La longitud de onda a la cual la intensidad del color es medida depende de la detección requerida. La intensidad del color amarillo es directamente proporcional a la concentración de fosfato.

Curva de Calibración

Primeramente, se determinó a que intervalo se iba a trabajar.

Para un intervalo de trabajo entre 1,0 mg/L a 20,0 mg/L: se prepararon las disoluciones estándar con un mínimo de 4 puntos en el intervalo de 1,0 mg/L a 20,0 mg/L en matraces volumétricos de 100 mL, para desarrollar el color como se indica en el procedimiento.

Digestión de la muestra

Preparación de la muestra por medio de la digestión con persulfato:

Se usaron 50 mL de la muestra bien mezclada. Se adiciono una gota de fenolftaleína. Posteriormente se adición 1 mL de disolución de ácido fuerte y 0,4 g de persulfato de amonio o 0,5 g persulfato de potasio.

Sobre la placa de calentamiento, se calentó la muestra hasta que el punto de ebullición, ahí se mantuvo entre 30 a 40 min o hasta sequedad alcanzando 10 mL. Los compuestos organofosforados pueden requerir de 1,5 h a 2 h para su digestión completa. Enseguida, se dejó enfriar, y luego se diluyó con 30 mL de agua,

posteriormente se adiciono una gota de fenolftaleína y se neutralizo hasta desvanecerse a un color rosa pálido con la disolución de hidróxido de sodio. Alternativamente, se calentó por 30 min en una autoclave entre 98 kPa a 137 kPa. Finalmente, se aforo a 100 mL con agua destilada.

En algunas muestras puede formarse un precipitado en esta fase, pero no se debe filtrar. Se debe mezclar bien para cualquier subdivisión de la muestra. El precipitado (posiblemente de fosfato de calcio) se redissuelve bajo condiciones ácidas de la prueba colorimétrica para determinar fósforo.

Procedimiento

Ajustar el pH de la muestra. Si la muestra tiene un pH mayor a 10, adicionar una gota de fenolftaleína a 50 mL de la muestra y después eliminar el color rosa con una disolución de ácido clorhídrico (1:1), antes de diluir a 100 mL. Las muestras de agua que se analizaron tenían un pH menor a 9. Por lo cual no fue necesario la adición de fenolftaleína.

Remoción del color de las muestras. A cada muestra (50 mL matraz Erlenmeyer) se le adiciono 200 mg de carbón activado y se agito por 5 min, posteriormente se filtró para remover el carbón activado.

Desarrollo del color en la muestra. Se tomó una alícuota que contenía de 0,05 mg a 1,0 mg de fósforo, en un matraz volumétrico de 50 mL. Se añadieron 10 mL de la disolución reactivo vanado-molibdato y se diluyó hasta la marca con agua. Se preparó un blanco usando una cantidad de agua equivalente a la alícuota de la muestra. Después de 10 min o más, se procedió a medir la absorbancia de una muestra contra un blanco a una longitud de onda de 400 nm a 490 nm (depende de la sensibilidad deseada).

Cálculos

La concentración de la muestra se calcula por medio de la ecuación obtenida de la curva de calibración y que es representada por la siguiente ecuación:

$$y = mX + b \quad (\text{ec. 1})$$

Donde:

m es la pendiente;

b es la ordenada al origen;

y es la absorbancia, y

X es la concentración (mg P/L⁻¹).

4.3.1.1.5 Alcalinidad total (Ak) como CaCO₃

La determinación de la alcalinidad en cada muestra de agua subterránea se realizó por el método de valoración con una sustancia titulante de acuerdo a la NMX-AA-036-SCFI-2001. Se tomaron 50 ml de la muestra y depositados en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, se introdujo el electrodo de un potenciómetro (Modelo "Orion", marca Thermo Scientific®), teniendo en cuenta el pH inicial, se valoró con Ácido Sulfúrico (H₂SO₄) y en el momento que la pantalla del equipo se observa la lectura en un pH igual a 4.5 se tomó el volumen consumido del titulante y se realizaron los cálculos. Según la siguiente formula:

$$Ak = \frac{V_g * N * 50}{V_m} \times 1000 \quad (\text{ec. 2})$$

Donde:

Ak = Alcalinidad de la muestra en mg CaCO₃ L⁻¹.

Vg = Volumen de titulante gastado en mL.

N = Normalidad del agente titulante en Eq L⁻¹.

50 = Es el factor para convertir eq L⁻¹ a mg CaCO₃ L⁻¹.

Vm = Volumen de muestra valorada en mL.

1000 = Factor para convertir de mL a L.

4.3.1.1.6 Nitrógeno Total (NT)

La determinación del NT para las 8 muestras de agua subterránea, se realizó siguiendo el método HACH 10072, por medio de una digestión con persulfato.

A continuación, se menciona el procedimiento empleado.

Primeramente, se precalentó el digestor (Modelo "DRB 200", Marca Hach®) a 105 °C. Posteriormente se añadió un sobre del reactivo de persulfato al tubo de digestión, y se adiciono 0.5 mL de la muestra. Después la muestra se tapó (cerro) y se agito por 30 segundos con ayuda de un vórtex. Una vez que el digestor alcanzó su temperatura de 105 °C se colocaron los tubos y se dejaron por 30 min. Una vez concluido el tiempo se retiraron los tubos y se dejaron enfriar a temperatura ambiente. Posteriormente se adiciono el reactivo "A" de NT al tubo, se tapó y se agito por 30 segundos con ayuda de un vórtex, y se dejó reaccionar por 3 min. Pasado el tiempo se adiciono el reactivo "B" de NT, se tapó y se agito por 15 segundos, en este punto la solución se tornó de color amarillo, dejando reaccionar por 2 min. Después se tomó una alícuota de 2 mL de este tubo de digestión y se adicionan al tubo NT Reagent C, se agito 10 veces y se dejó reaccionar por 5 min. Finalmente, trascurrido el tiempo se tomó la lectura correspondiente en el espectrofotómetro UV-vis (modelo "Lambda 365", Marca Perkin Elmer®).

4.3.1.1.7 Demanda química de Oxígeno (DQO)

La determinación de DQO se realizó de acuerdo a la NMX-AA-030/2-SCFI-2011 por el método de reflujo cerrado o método espectrofotométrico. Las muestras utilizadas corresponden a las muestras de agua subterránea.

Soluciones y Materiales

A continuación, se mencionan las disoluciones principales que se prepararon para realizar el análisis.

- 1) Para la disolución estándar de biftalato de potasio ($C_8H_5KO_4$), se pesaron 0.851 g de ($C_8H_5KO_4$), posteriormente se secó a 120°C durante 2 h. Una vez seco, se disolvió en agua y se aforó a 1 L en matraz volumétrico.
- 2) Para la disolución de Sulfato de plata (Ag_2SO_4) en Ácido sulfúrico (H_2SO_4). Se pesaron 15 g de H_2SO_4 y se disolvieron en 1 L de H_2SO_4 concentrado. Una vez preparada la solución, se dejó reposar durante 2 días para asegurar la completa disolución antes de ser utilizada.

- 3) Para la disolución digestora, se pesó 10.216 g de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), posteriormente se secó a $105^\circ C$ por 2 h. Una vez seco, se añadieron 500 mL de agua, 167 mL de H_2SO_4 concentrado y 33.300 g de $HgSO_4$, para posteriormente aforar la solución a 1L con agua destilada y empleando un matraz volumétrico.

Curva de calibración

Para elaborar la curva de calibración se realizaron los cálculos necesarios para establecer el intervalo de la curva de calibración con la siguiente ecuación.

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad (\text{ec. 3})$$

Con la finalidad de conocer los distintos volúmenes de cada dilución. Se preparó la solución patrón a una concentración de 1000 mg L^{-1} , utilizando matraces volumétricos de 25 mL, y micropipetas de 10 mL para hacer las disoluciones. A continuación, se describe el procedimiento empleado para su preparación.

Procedimiento

Primero se colocó el volumen deseado de la solución patrón de ($C_8H_5KO_4$) previamente preparada, en cada uno de los matraces de 25 mL. Posteriormente se colocó el volumen deseado de ($C_8H_5KO_4$) se aforaron los matraces a 25 mL con agua destilada. Después se colocaron 2.5 mL de cada matraz en cada uno de los tubos para digestión de 16 mm x 100 mm con tapa. 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 y 3.5 mL de la disolución de Ag_2SO_4 en H_2SO_4 . Una vez adicionado el H_2SO_4 se tapó inmediatamente el tubo para evitar la volatilización de los compuestos orgánicos. Posteriormente los tubos preparados se colocaron en el digestor (Modelo "DRB 200", Marca Hach®), previamente calentado a $150^\circ C$, durante 2 h. Concluido este tiempo, se dejaron enfriar a temperatura ambiente, para posteriormente medir la absorbancia a 600 nm en espectrofotómetro UV-vis (modelo "Lambda 365", Marca Perkin Elmer®).

Cuantificación de DQO en las muestras.

Para determinar la concentración de DQO en cada una de las muestras a analizar, se empleó el procedimiento siguiente:

Primero se tomaron 2.5 mL de la muestra a analizar y se colocaron en los tubos para digestión de 16 mm x 100 mm con tapa. En la campana de gases, se añadió a cada uno de los tubos un volumen de 1.5 mL de la disolución digestora y 3.5 mL de la disolución de Ag_2SO_4 en H_2SO_4 . Una vez adicionado el H_2SO_4 se tapó inmediatamente el tubo para evitar la volatilización de los compuestos orgánicos. Los tubos preparados se colocaron en el digestor (Modelo "DRB 200", Marca Hach®), previamente calentado a 150°C , durante 2 h. Pasando el tiempo, se dejaron enfriar a temperatura ambiente, para posteriormente medir la absorbancia a 600 nm en espectrofotómetro UV-vis (modelo "Lambda 365", Marca Perkin Elmer®).

4.3.1.1.8 Sólidos Totales (ST)

La determinación de ST se realizó para las 8 muestras de agua subterránea de acuerdo a la NMX-AA-034-SCFI-2015. Los ST representan el residuo que permanece en una cápsula después de evaporar y secar una muestra a una temperatura de $105^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

A continuación, se menciona el procedimiento para la preparación de los crisoles, el procedimiento y los cálculos necesarios.

Preparación de crisoles

1. Introducir los crisoles a la estufa a una temperatura de $105 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 20 minutos y posteriormente a $550 \pm 50^\circ\text{C}$ durante 1 h.
2. Trasladar crisol a desecador y dejar enfriar por 20 minutos.
3. Pesar las cápsulas y repetir el ciclo del horno (Modelo "Heratherm Oven", marca Thermo Scientific®), al desecador hasta obtener una diferencia de 0.0005 g en dos pesadas consecutivas y registrar como m.

Procedimiento.

1. Agitar la muestra de agua para homogeneizar.

2. Tomar 50 mL de la muestra de agua con pipeta volumétrica y colocarlos en capsula de porcelana, previamente pesada a peso constante.
3. Secar en estufa (Modelo “Heratherm Oven”, marca Thermo Scientific®), a una temperatura de 105 ± 2 °C hasta peso constante.
4. Al termino de esto, pesar la capsula con los sólidos y registrar como m1.
5. Realizar los respectivos cálculos.

Cálculos

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

$$ST = \frac{m_1 - m}{V} \times 1\,000\,000 \quad (\text{ec. 4})$$

Donde:

ST = Sólidos totales, en mg L⁻¹.

m = Peso de la cápsula vacía en mg.

m₁ = Peso de la cápsula con el residuo, después de la evaporación en mg.

V = Volumen de la muestra en mL.

4.3.1.1.9 Sólidos suspendidos totales

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 µm secado y llevado a masa constante a una temperatura de 105 ± 2 °C. A continuación, se describe el procedimiento utilizado para determinar los SST en las 8 muestras de agua subterránea.

Preparación de dispositivo de filtración

1. Utilizar filtro de fibra de vidrio de 1.5 µm de tamaño de poro y colocar la parte rugosa hacia arriba de los crisoles Gooch.
2. Mojar filtro con agua destilada para que se adhiera al crisol.
3. Introducir crisoles a la estufa a 105 ± 2 °C por 20 minutos e introducir al desecador.

4. Pesar el dispositivo de filtración y repetir el paso anterior hasta obtener una diferencia de 0.0005 g en 2 pesadas consecutivas y registrar como m_3 .

Procedimiento

1. Montar sistema de filtración.
2. Homogenizar muestra y seleccionar un volumen de acuerdo a las características de la muestra.
3. Medir un volumen conocido de muestra (20 mL) en probeta y colocar en sistema de filtración, posteriormente enjuagar la probeta para arrastrar residuos y verter en el dispositivo de filtración hasta filtrar totalmente la muestra líquida.
4. Introducir el dispositivo de secado en estufa (Modelo “Heratherm Oven”, marca Thermo Scientific®) a 105 ± 2 °C durante 1 h.
5. Realizar paso 4 de la preparación de dispositivo de filtración y registrar como m_4 .

Cálculos

$$SST = \frac{m_4 - m_3}{V} \times 1\,000\,000 \quad (\text{ec. 5})$$

Donde:

SST = Sólidos suspendidos totales, en mg L^{-1} .

m_3 = Peso del dispositivo antes de la filtración en mg.

m_4 = Peso del dispositivo después de la evaporación en mg.

V = Volumen de la muestra en mL.

5.3.2.1.10 Sólidos Disueltos Totales (SDT)

De acuerdo a la NMX-AA-034-SCFI-2001 “Análisis de agua determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales residuales y residuales tratadas”, la determinación de los sólidos disueltos totales es por diferencia entre los sólidos totales menos sólidos suspendidos totales.

$$SDT = ST - SST \quad (\text{ec. 6})$$

4.3.1.1.11 Sólidos Suspendidos Volátiles (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.

Procedimiento

1. Introducir dispositivo de filtración, registrado como m_4 , a la mufla (Modelo “Linderberg M”, marca Thermo Scientific®) con una temperatura de $550 \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 1 h.
2. Trasladar el dispositivo calcinado a la estufa (Modelo “Heratherm Oven”, marca Thermo Scientific®) a una temperatura de $550 \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 20 minutos.
3. Realizar paso 3 y 4 de la preparación del dispositivo de filtración y registrar como m_5 .

Cálculos

$$SSV = \frac{m_4 - m_5}{V} \times 1\,000\,000 \quad (\text{ec. 7})$$

Donde:

SST = Sólidos suspendidos totales, en mg L^{-1} .

m_4 = Peso del dispositivo después de la evaporación en mg.

m_5 = Peso de la cápsula con el residuo, después de la evaporación en mg.

V = Volumen de la muestra en mL.

4.3.1.1.12 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 $550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$. La determinación STV en las 8 muestras de agua subterránea, se realizó de acuerdo a la NMX-AA-034-SCFI-2015 para la determinación de cenizas.

Procedimiento.

1. Introducir en la mufla (Modelo “Linderberg M”, marca Thermo Scientific®) los crisoles con el residuo seco a $105 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ según la evaluación de ST.

2. Subir la temperatura a $5^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ hasta 550°C y mantener durante dos horas, lentamente disminuir hasta menos de 200°C .
3. Retirar de la estufa las muestras (Modelo “Heratherm Oven”, marca Thermo Scientific®), y colocarlas en un desecador, tapar cuidadosamente y dejar enfriar.
4. Sacar los crisoles del desecador e inmediatamente pesar y registrar como m_2 .
5. Realizar los cálculos respectivos (Véase la sección de ST para determinar el valor de m_1).

Cálculos

Calcular los sólidos volátiles, tal como se recibió, según la siguiente formula:

$$STV = \frac{m_1 - m_2}{V} \times 1\,000\,000 \quad (\text{ec. 8})$$

Donde:

STV = Sólidos totales volátiles, en mg L^{-1} .

m_1 = Peso de la cápsula con el residuo, después de la evaporación en mg.

m_2 = Peso de la cápsula, después de la calcinación en mg.

4.3.1.2 Agua superficial

Las muestras de agua superficial de las dos campañas también se caracterizaron fisicoquímicamente a través de los procedimientos descritos en la sección anterior.

4.3.2 Análisis de BTEX

4.3.2.1 Cromatografía de gases

La cromatografía de gases (CG) es la técnica usada principalmente para la separación y análisis de compuestos volátiles, en el cual los componentes son distribuidos entre dos fases (móvil y estacionaria), basado en el principio de retención selectiva. Consiste en inyectar una determinada muestra en la columna, y sus compuestos se separan por medio de la fase móvil basándose en su diferente interacción (distribución o adsorción) con la fase estacionaria. Los compuestos con afinidad baja por la fase estacionaria atraviesan la columna más rápidamente y eluyen antes. Los compuestos eluidos del extremo de la columna se analizan mediante un detector adecuado (OMS, 2006; García, A., *et. al.*, 2011).

En esta investigación, se utilizó un detector de ionización de flama (FID). Este detector posee una alta sensibilidad y responde casi de la misma manera por unidad de masa de analito sin que influya su estructura química mientras tenga carbonos orgánicos.

El FID se basa en la conductividad eléctrica de los gases. Los gases se comportan como aislantes (a temperatura ambiente y presión normales), pero si en su interior existen átomos o moléculas cargadas eléctricamente, o electrones libres, se produce un incremento en la conductividad. Las moléculas de la muestra, que están presentes en el gas de arrastre, llagan al detector y son quemadas por la llama produciendo por la combustión de aire e hidrogeno, dando como resultado la formación de iones los cuales son reunidos en un electrodo colector que genera una corriente, que es convertida en voltaje, y posteriormente amplificada para ser captada por el detector (OMS, 2006; García, A., *et. al.*, 2011).

4.3.2.2 Dispositivo experimental

El análisis de BTEX fue realizada utilizando cromatografía de gases de alta resolución con detector de ionización de flama (CG-FID) marca Agilent modelo GC 7820^a.

En la Figura 22, se presenta la descripción del sistema experimental implementado para el análisis de los BTEX en muestras de agua superficial y agua subterránea. 30 mL de muestra de agua se colocaron en el saturador previamente lavado con agua desionizada y se colocó en línea con el flujo de nitrógeno grado cero previamente calibrado a ($35 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$), enseguida se verifica la hermeticidad del sistema y se enfría la muestra a 10°C mediante un baño María inverso (hielo). En seguida se abre la válvula de nitrógeno gas, y los vapores de los BTEX a 10°C son transporta hasta el sistema de inyección del CG-FID. La muestra será inyectada al CG-FID por medio de la válvula neumática de 6 vías a temperatura de 150°C , mediante un sistema neumático la válvula gira y la muestra entra en contacto con el gas de gas de barrido (Argón grado cromatográfico INFRA, 99.9999%), inmediatamente, la muestra fue transportada a la columna capilar de sílice. (Marca Supelco, Column No. 65233-03A) ($L \times \text{I.D. } 30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm}$, $df 0.25 \mu\text{m}$) instalada dentro del horno a 110°C (análisis isotérmico). Ahí se llevará a cabo la separación de las moléculas de interés y posteriormente sean analizadas en el detector FID a 250°C . Las señales eléctricas son transformadas por medio del software (EZChrom Elite 3.2.0) y posteriormente integradas en el mismo software. Las áreas obtenidas 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.

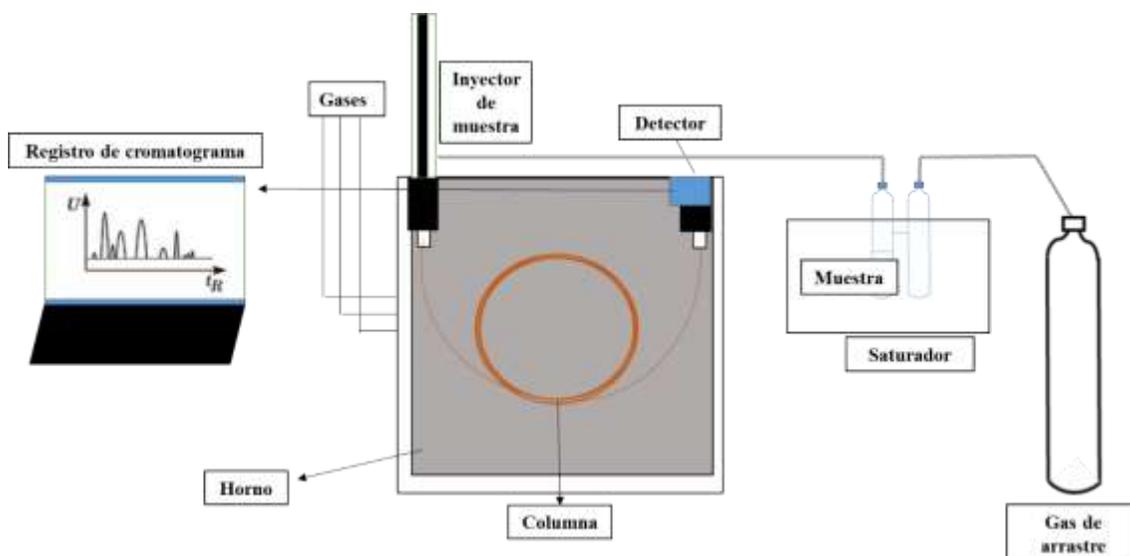


Figura 22. Dispositivo experimental (Cromatografía de Gases).

4.3.2.2.2 Estándares químicos y cuantificación.

La curva de calibración se obtuvo a partir de estándares químicos para poder realizar una medición cuantitativa de la concentración de BTEX en las muestras acuosas.

Se utilizó el Estándar Analítico en DMSO, $1 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ (Sigma Aldrich, Catálogo No.: 43728-10X1ML) para implementar el método cromatográfico (tiempos de retención de los analitos y curvas cromatográficas).

Tabla 4. Tiempos de retención de los BTEX empleando una columna capilar de sílice. $T_{\text{horno}}=110^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{detector}}=250^{\circ}\text{C}$ y $P_{\text{inyector}}=12 \text{ Psia}$.

Compuesto	Tiempo de retención min	P Ebullición ($^{\circ}\text{C}$)
Benceno	3.34	80
Tolueno	3.9	110
Etilbenceno	4.5	136
Xileno	4.7	138

Para las curvas de calibración, se utilizó el mismo estándar y se prepararon 3 soluciones con las siguientes concentraciones 0.5 y 1 ppm, disolviendo en

diferentes volúmenes de matraces volumétricos. Los tiempos de retención y el área de pico de cada uno de los componentes (Véase Figuras 23 y 24).

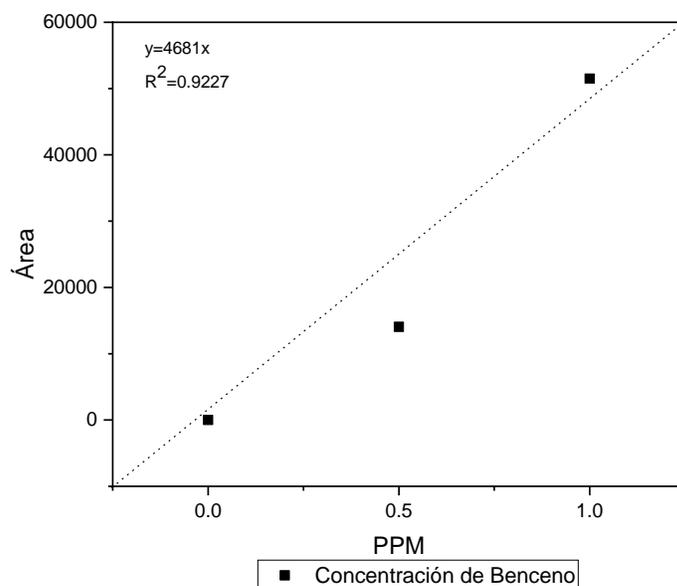


Figura 23. Curva de calibración de benceno.

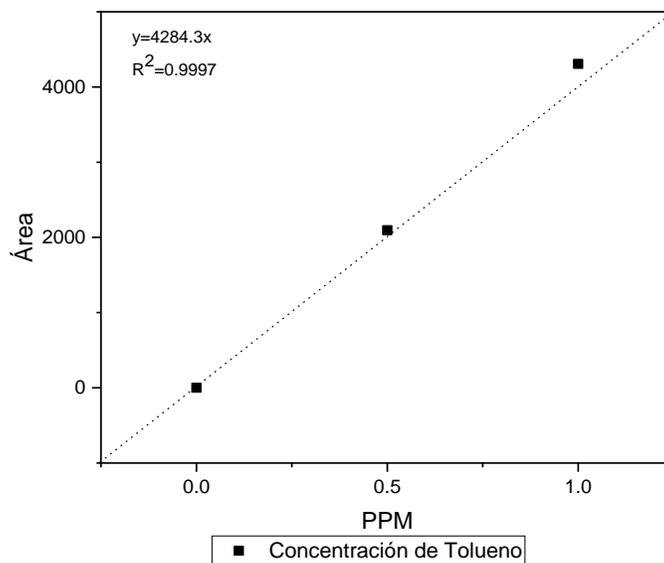


Figura 24. Curva de calibración del Tolueno.

4.3.2.2.3 Normativa y límites máximos permisibles (LMP) para BTEX

Los resultados obtenidos de las diferentes muestras serán comparados con respecto a las siguientes agencias regulatorias: La *Australian Drinking Water Guidelines (ADWG)*, OMS, US EPA y la Norma Mexicana Modificación-NOM-127-SSA1-1994.

La modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (modificación, año 2000) y la OMS reportan como límites máximos permisibles 0.01 ppm para Benceno y 0.7 ppm para Tolueno. Mientras que la US EPA reporta valores de 0.005 ppm para Benceno y 1 ppm para Tolueno. La agencia ADWG es la más rigurosa puesto que reporta como LMP 0.001 ppm para benceno y 0.025 ppm para Tolueno.

El LMP de concentración de benceno establecido por la OMS en sus guías para la Calidad del agua para consumo humano (0.01 mg/L), es derivado del modelo robusto de exportación lineal aplicado a leucemia y linfomas en ratones. Para benceno, la ADWG establece que no hay una concentración segura o aceptable de benceno, el valor dado (0.001 mg/L), es basado en el límite de detección del método (instrumental).

El LMP de concentración de Tolueno establecido por la OMS en sus guías para la Calidad del agua de bebida (0.07 mg/L), está basado en una cuota del agua de 10% de ingesta diaria total para un adulto de 60 kg con un consumo de 2 L/día. Para Tolueno, la ADWG establece que para agua de bebida la concentración no debe exceder 0.025 mg/L, esto basado en consideraciones estéticas como el olor y el sabor.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIONES

CAPÍTULO 5 RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Geología Estructural

En Figura 25, se muestran las fracturas identificadas en campo, las cuales corresponden a tipo “ac” y tipo “bc”. En la Figura 26, se representaron los datos obtenidos en campo de las fracturas en porcentajes. De acuerdo a los porcentajes obtenidos, en el área de estudios se tiene una mayor presencia de fracturas tipo “ac” con dirección SW-NE y en menor cantidad de tipo “bc” con dirección NW-SE.

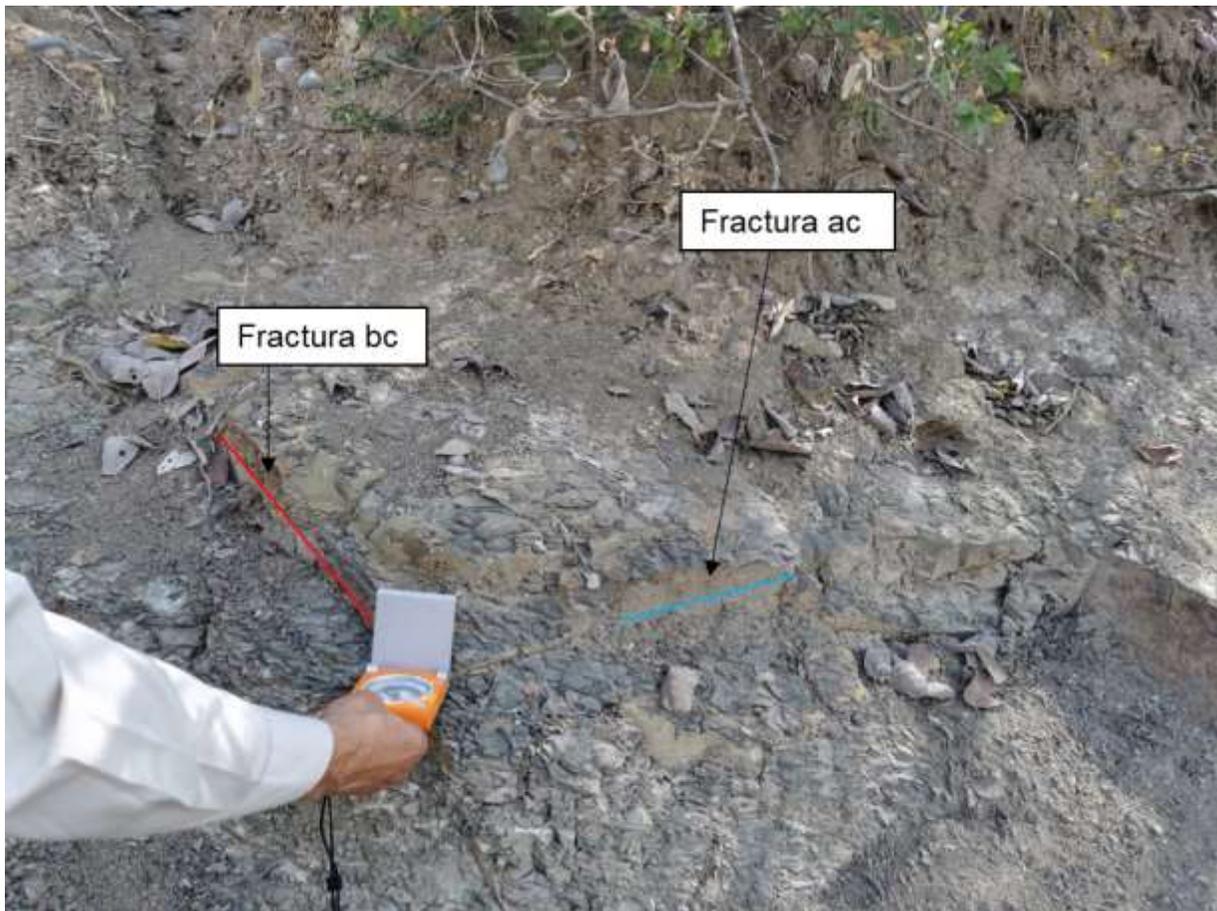


Figura 25. Familias de fracturas tipo "ac" y tipo "bc" en campo.

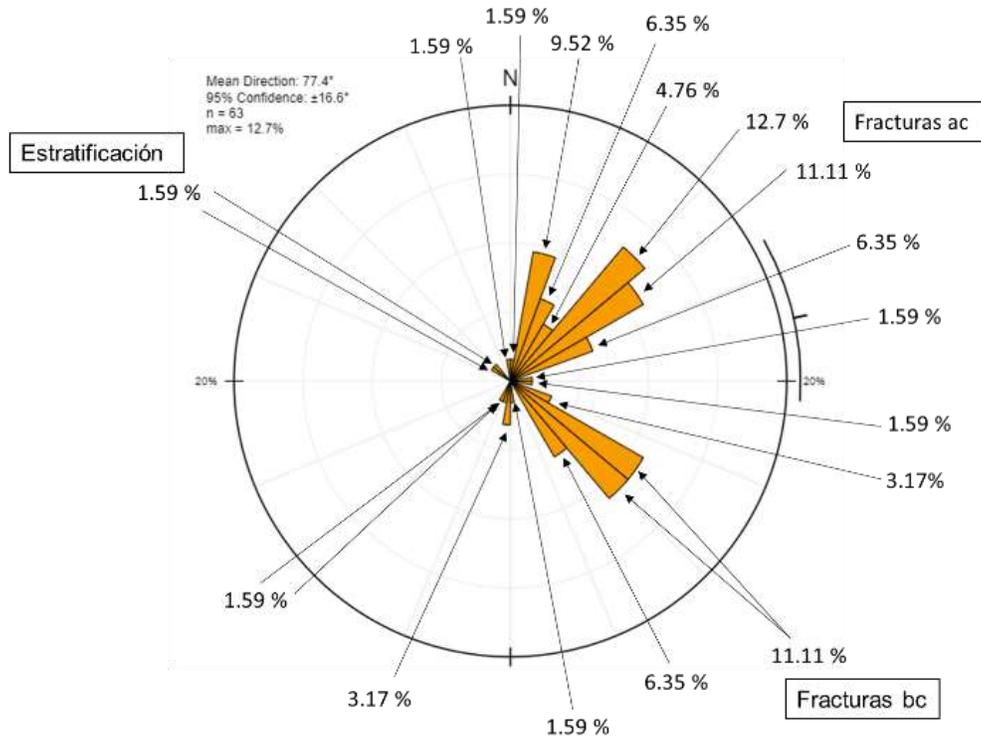


Figura 26. Representación en porcentajes de la familia de fracturas.

5.2 Terrazas

Las terrazas se clasificaron de acuerdo su depositación, posición topográfica, espesores, composición y su edad. Partiendo de lo más joven a lo más antiguo. Se identificaron 3 tipos de terrazas, además del contacto geológico de la terraza 1 con la Formación Méndez.

5.2.1. Sedimentos Aluviales (SA)

Los sedimentos aluviales corresponden al lecho o terraza de inundación reciente de la corriente del río San Juan. En la Figura 27, se observa la composición de los sedimentos los cuales son gravas, arenas, limos y arcillas, donde las gravas son de diferentes tamaños desde pequeños a grandes y de formas subangulosas, los cuales están ligeramente a medianamente cementadas. La conductividad hidráulica (K), se encuentra entre los valores promedios, que van de 8.7×10^4 a 3.1×10^2 m/día (Martínez Quiroga, 2018).



Figura 27. Sedimentos aluviales (SA) en el río Santa Catarina. Coordenadas UTM: 404580 E; 2826928 N.

5.2.2 Terraza 3

En la Figura 28, se observa que la terraza 3 corresponde al primer escalón o nivel sobre el mismo cauce del río. Está compuesta principalmente de sedimentos arenosos limosos con gravas sub angulares a redondeadas de diversos tamaños y gravas arenosas limosas ligeramente cementadas en menor proporción. Tiene un espesor de aproximadamente 3 m. La terraza 3 no aflora en todo el río, debido a que en algunos puntos está completamente erosionada en sus meandros o destruida por construcciones de obras civiles. La conductividad hidráulica (K), se encuentra entre 2.1×10^{02} m/día a 9×10^{01} m/día, estos valores son calificados como permeables (Martínez Quiroga, 2018).



Figura 28. Terraza 3. Coordenadas 404566 E; 2826934 N.

5.2.3 Terraza 2

La terraza 2 se observa previamente en la Figura 29. Está compuesta por materiales muy finos como limos y arcillas. Tiene un espesor de aproximadamente 3 metros. Esta terraza no aflora en todo el cauce del río debido a la construcción de diversas obras civiles. La conductividad hidráulica (K) de la terraza 2, presenta un valor de 3.9×10^{02} m/día (Martínez Quiroga, 2018).



Figura 29. Terraza 2. Coordenadas UTM 407049 E; 2825166 N.

5.2.4 Sedimentos Finos

Los sedimentos finos son materiales que se encuentran entre la terraza 2 y la terraza 1. Los sedimentos están constituidos principalmente por limos y arcillas, mezclados en diferentes proporciones con gravas finas y arenas, ligeramente con grados de compactación. Contienen lentes de conglomerados empacados en arenas y arcillas, depósitos areno-limosos y horizontes de caliche. Estos sedimentos finos confirman las parcelas y huertas de la zona de estudio (Véase Figura 30).



Figura 30. Sedimentos finos Coordenadas UTM 405557 E; 2826736 N.

5.2.5 Terraza 1

En las Figura 31, se observa que la terraza 1 está compuesta principalmente por conglomerados ya consolidado, el cual contiene fragmentos redondeados a subredondeados de rocas calcáreas de tamaño promedio de 5 a 12 cm de diámetro, empaçados en una matriz arenosa cementada por caliche. Tiene un espesor de aproximadamente 4 a 5 m. En ciertos sitios ésta se encuentra en contacto con las lutitas de la formación Méndez (Véase Figura 32). La conductividad hidráulica (K) de la terraza 1, presenta un valor de 3.7×10^{-01} m/día, que aún es considerado como permeable (Martínez Quiroga, 2018).



Figura 31. Terraza 1. Coordenadas UTM 407530 E; 2829211N.

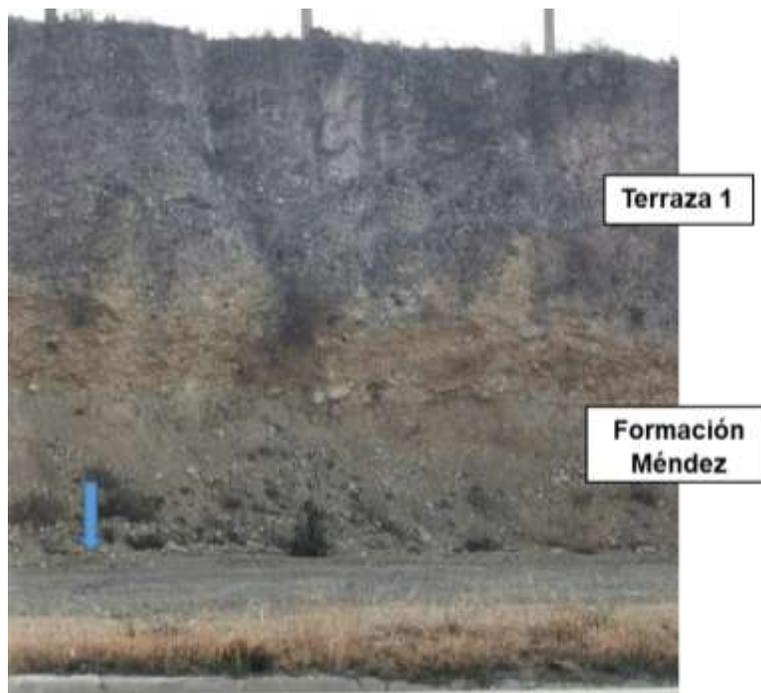


Figura 32. Terraza 1 en contacto con la Formación Méndez. Coordenadas UTM: 402726 E; 2831212 N.

5.2.6 Formación Méndez

La Formación Méndez se compone de lutitas y margas, estas son de color marrón claro-verdoso y gris con estratificación laminar, presentan un alto grado de fracturamiento, caracterizado por formar las “estructuras de lápiz”. La formación Méndez tiene un espesor de 1.80 m. En la Figura 33, se muestra como esta formación limita con la terraza 1, por lo cual solo aflora en algunos puntos del área de estudios.



Figura 33. Contacto de la Formación Méndez con la terraza 1 (Refinería). Coordenadas UTM 404215 E; 2829177 N.

Por otra parte, la Formación Méndez se encuentra aflorando en algunos puntos del cauce del río, en la Figura 34, se muestra el contacto de dicha formación con el cauce del río San Juan, también se identificaron las dos familias de fracturas características en el área de estudios las cuales son del tipo “ac” y “bc”.

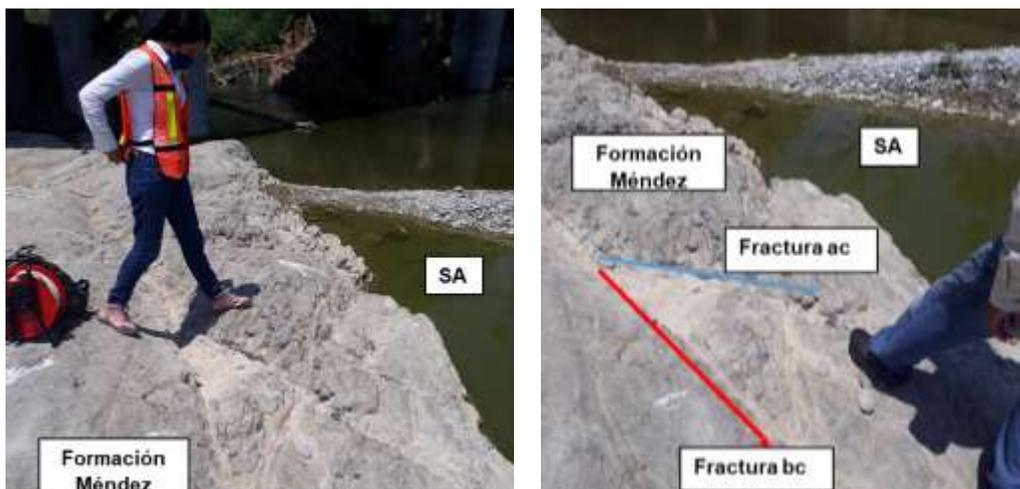


Figura 34. Contacto de la Formación Méndez con los sedimentos aluviales. Coordenadas UTM 407615 E; 2824948 N.

5.1.2 Uso de drones

Mediante el procesamiento de imágenes fue posible la obtención de los ortomosaicos, esto nos permitió tener una mayor calidad de imagen lo que nos permitió clasificar las terrazas en determinados puntos para posteriormente correlacionarlos entre si.

En la Figuras 35, se identificaron los sedimentos aluviales, la terraza 3, la terraza 2 y los sedimentos finos.

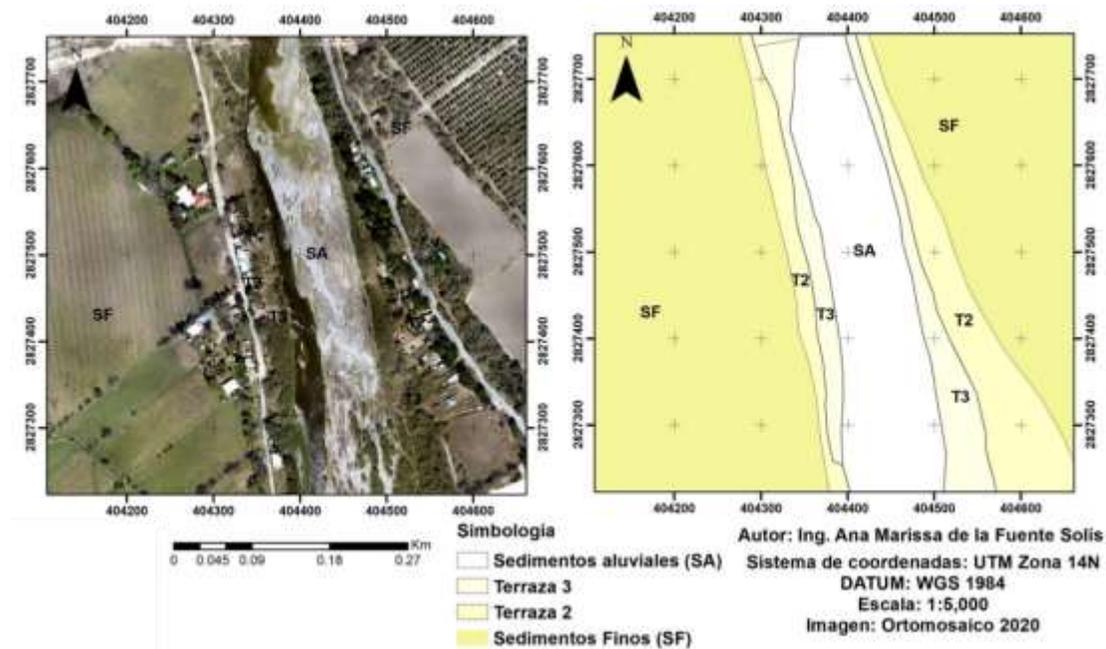


Figura 35. Ortomosaico P1.

De igual manera en la Figura 36, se identificaron los sedimento aluviales, la terraza 3, la terraza 2 y los sedimentos finos.

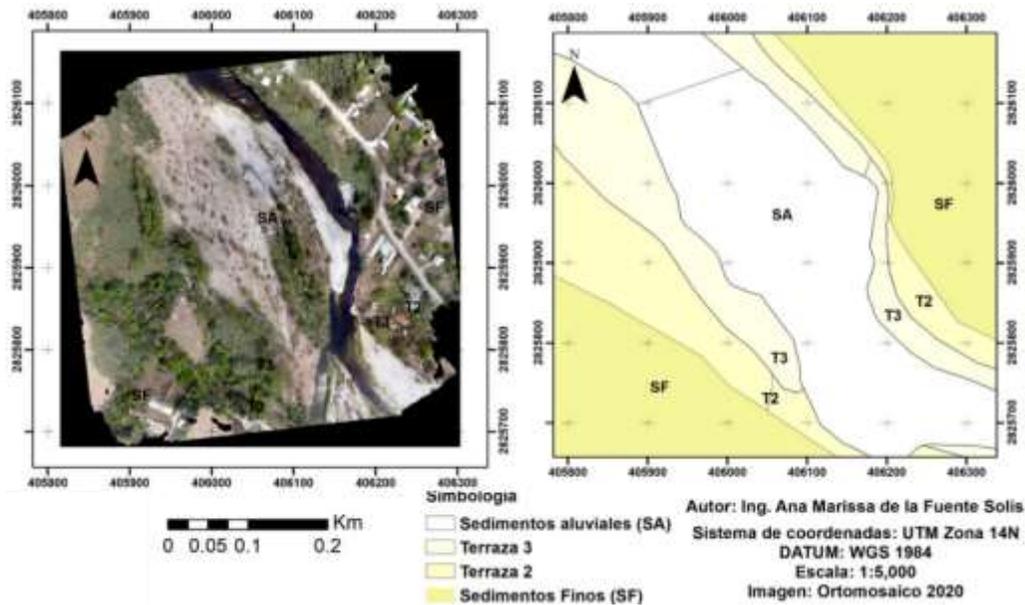


Figura 36. Ortomosaico P2

Por ultimo en el Ortomosaico P3, correspondiente a la Figura 37, se identificaron los sedimentos aluviales, la terraza 3, la terraza 2 y los sedimentos finos.

En los diferentes puntos donde se localizaron los ortmosaicos no se identificó la terraza 1, esto es debido a que esta terraza no aflora cerca del cauce del río.

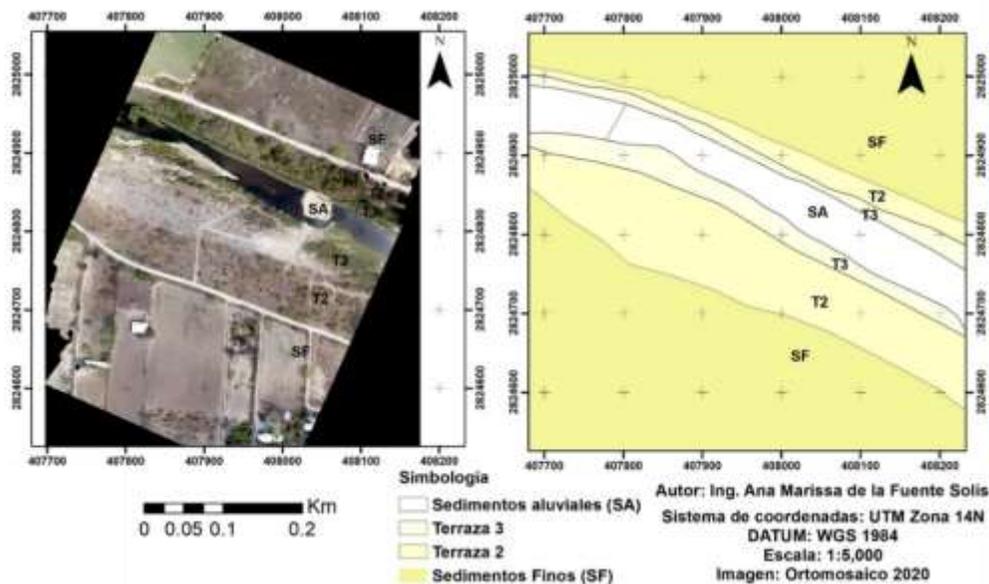


Figura 37. Ortomosaico P3

5.3 Fotointerpretación

En conjunto con los recorridos de campo, se identificaron las diferentes terrazas mediante la interpretación de las imágenes obtenidas mediante los ortmosaicos y las imágenes de Google Earth.

En la Figura 38, se muestra la carta geológica del área de estudio, se realizó la clasificación de las terrazas, así como también se identificó donde aflora la Formación Mendéz. En la Carta Geológica podemos observar la distribución de los sedimentos alviales, sedimentos finos y las zonas en donde afloran las terrazas 1, 2 y 3. Es importante destacar que la refinería “Hector R. Lara Sosa” se encuentra sobre conglomerado de la terraza 1 y en contacto con la Formación Mendéz. Por otra parte, en el cauce del río se identificaron 2 zonas en donde afloran las lutitas de la Formación Mendéz.

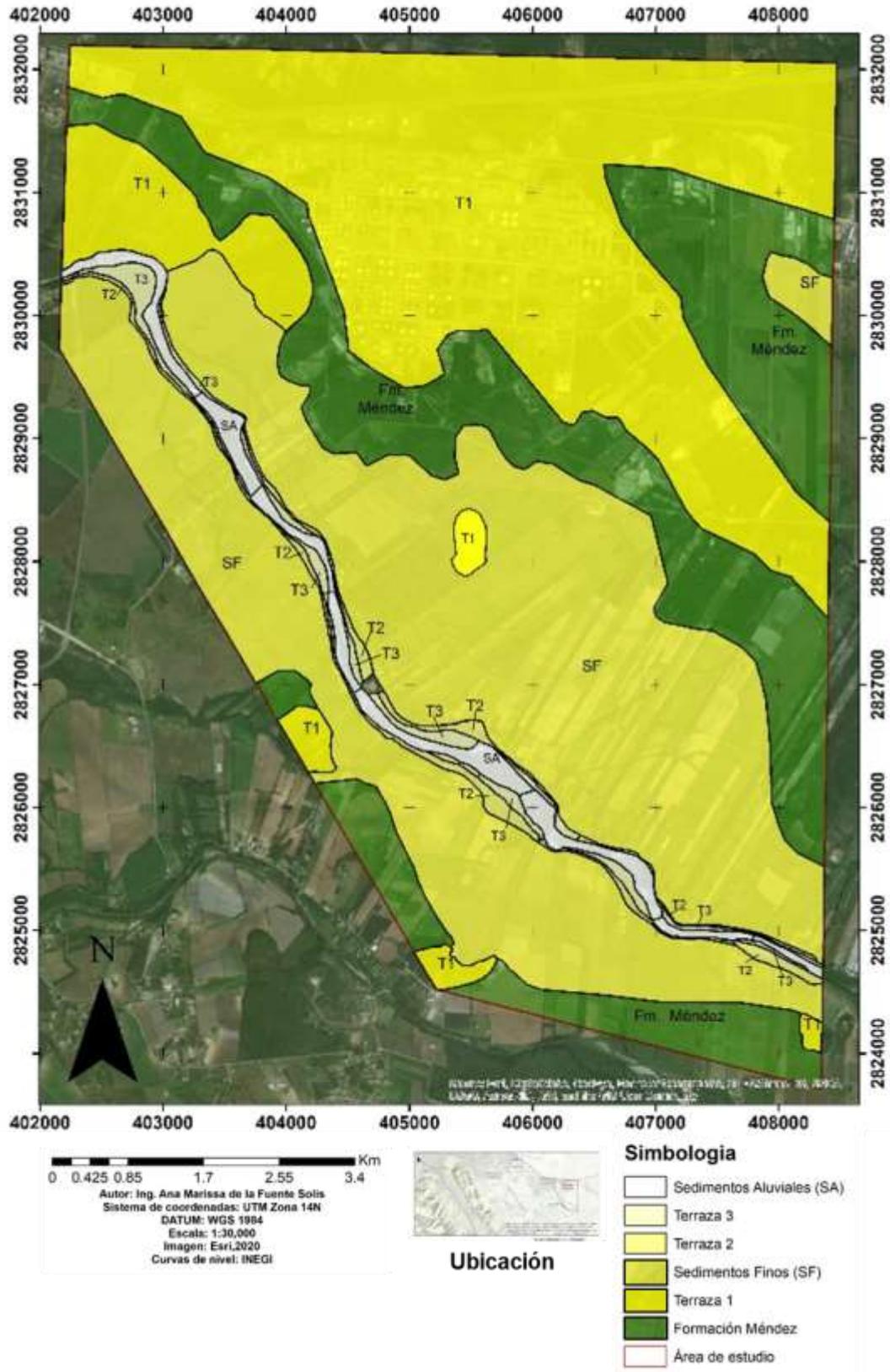


Figura 38. Carta Geológica del área de estudio.

5.2 Hidrogeología

5.2.1 Cartas piezométricas

Acorde a las cartas piezométricas obtenidas para los años 2019 (Véase Figuras 39 y 40) y 2020 (Figura 41), correspondientes a la temporada ordinaria-sequia, se muestra una dirección preferencial de flujo subterráneo de noroeste a sureste. Partiendo del noreste (PR-1), donde se presentan las mayores alturas piezométricas, las cuales van disminuyendo hacia el sureste.

El nivel piezométrico (msnm) más alto del mes de octubre corresponde al pozo PR-1 (311.32 msnm), mayor al nivel piezométrico correspondiente al mes de noviembre del mismo pozo (309.36 msnm). Los niveles más bajos pertenecen al pozo PR-2 (285.4), PR-3 (283.88 msnm) y a la noria PR-8 (285.83 msnm), correspondientes al mes de noviembre. Se puede observar que hay una diferencia entre 1 y 2 metros en los niveles piezométricos entre los dos meses de octubre y noviembre 2019.

El gradiente hidráulico (i) calculado para el mes de octubre del 2019 presentó un valor medio de 0.00448 (4.48 %), para el mes de noviembre del 2019 presentó un valor medio de 0.00404 (4.04 %), mientras que para el mes de agosto del 2020 el valor medio fue 0.00442 (4.42 %).

La Figura 42, muestra que los niveles estáticos del agua subterránea medidos variaron entre los 3 a los 27 m. En la Figura 43, se muestra que los niveles piezométricos más altos pertenecen al mes de agosto del 2020.

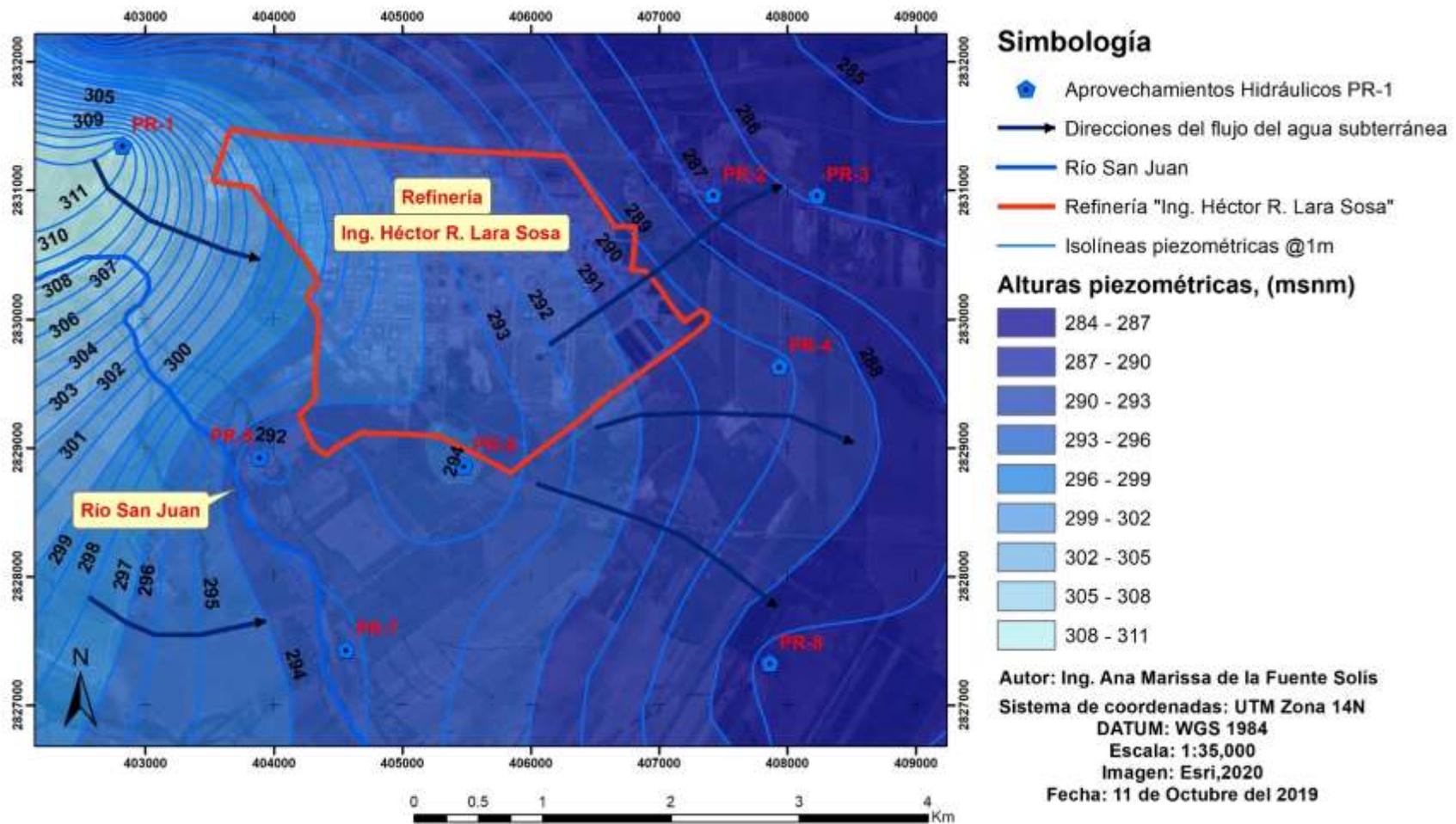


Figura 39. Carta piezométrica correspondiente al mes de octubre del 2019.

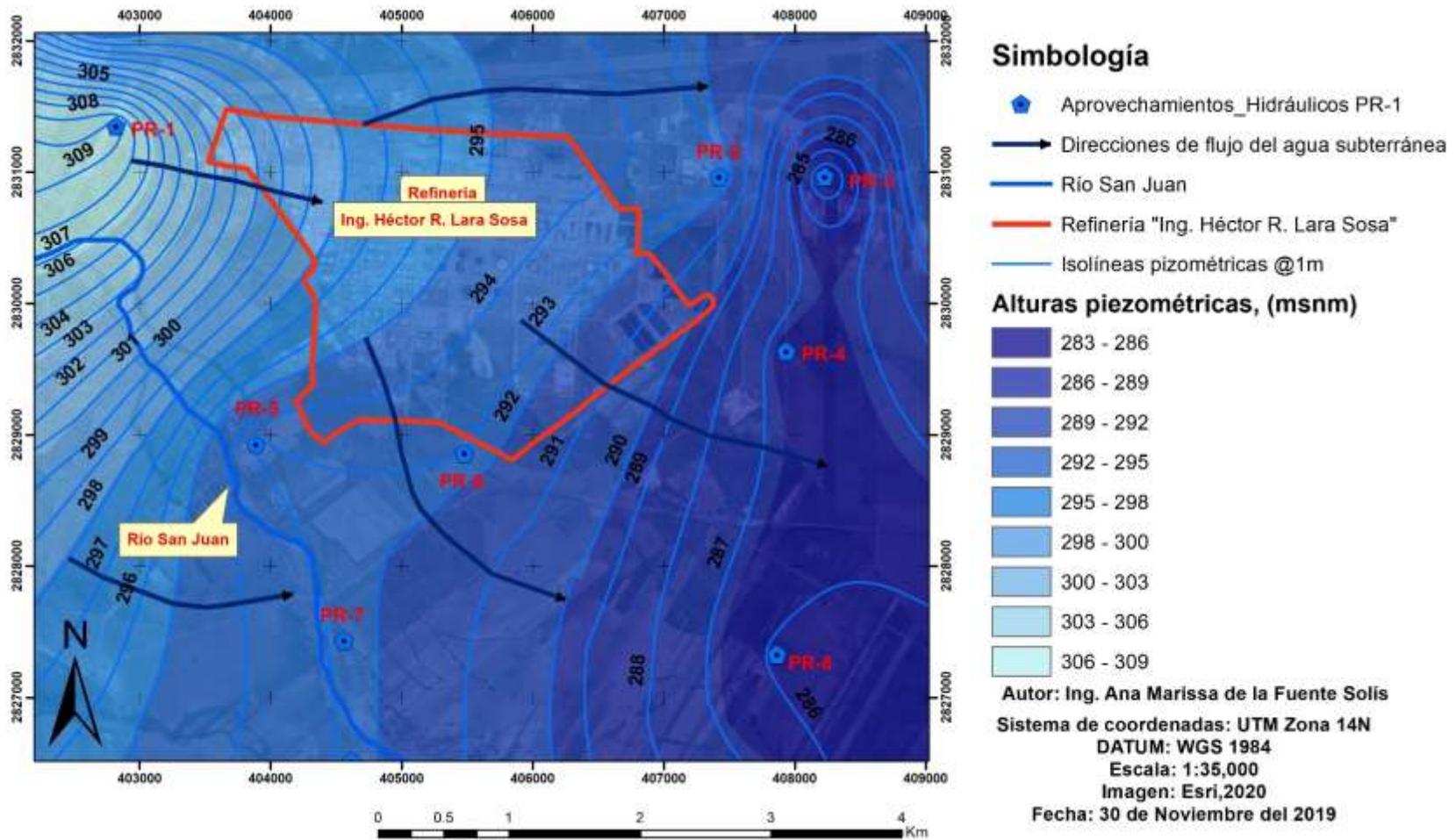


Figura 40. Carta piezométrica correspondiente al mes de noviembre del 2019.

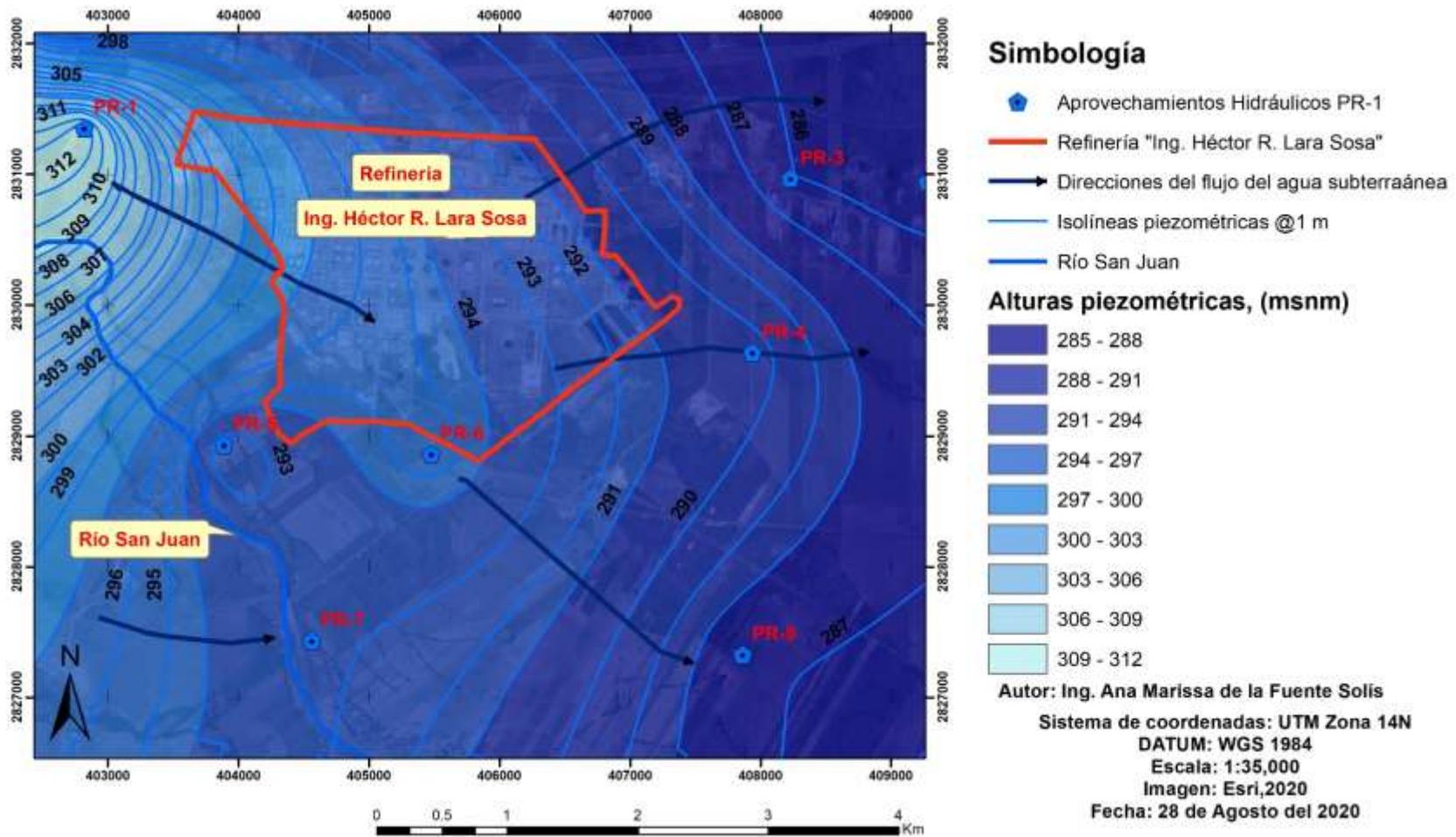


Figura 41. Carta piezométrica correspondiente al mes de agosto del 2020.

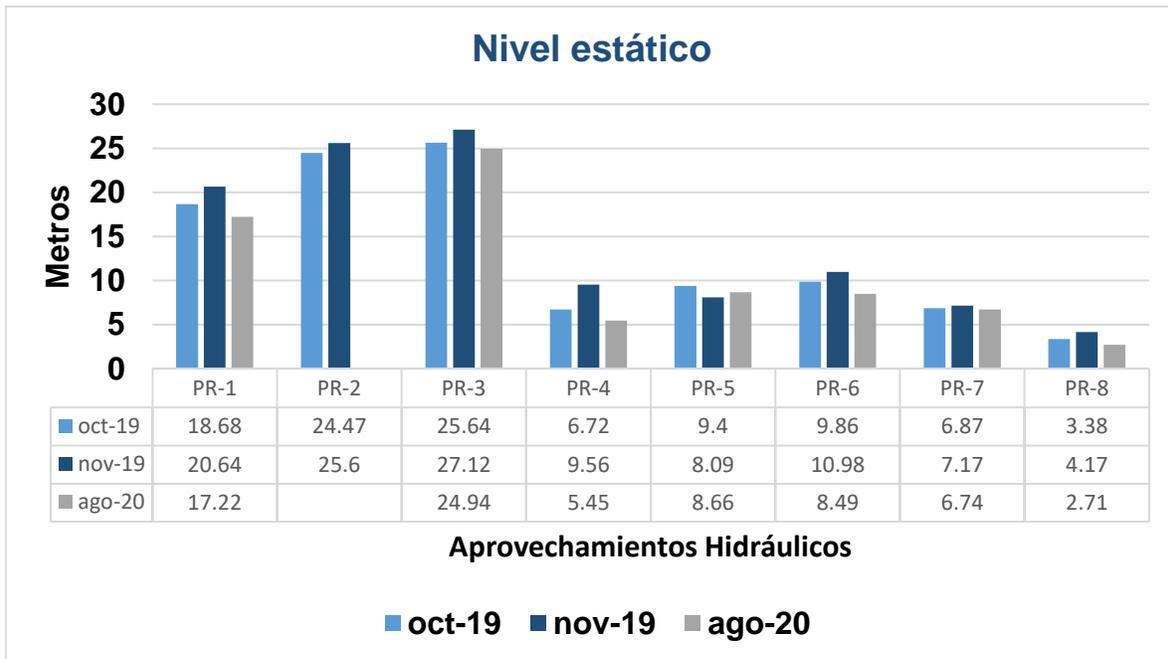


Figura 42. Niveles estáticos durante los años 2019-2020.

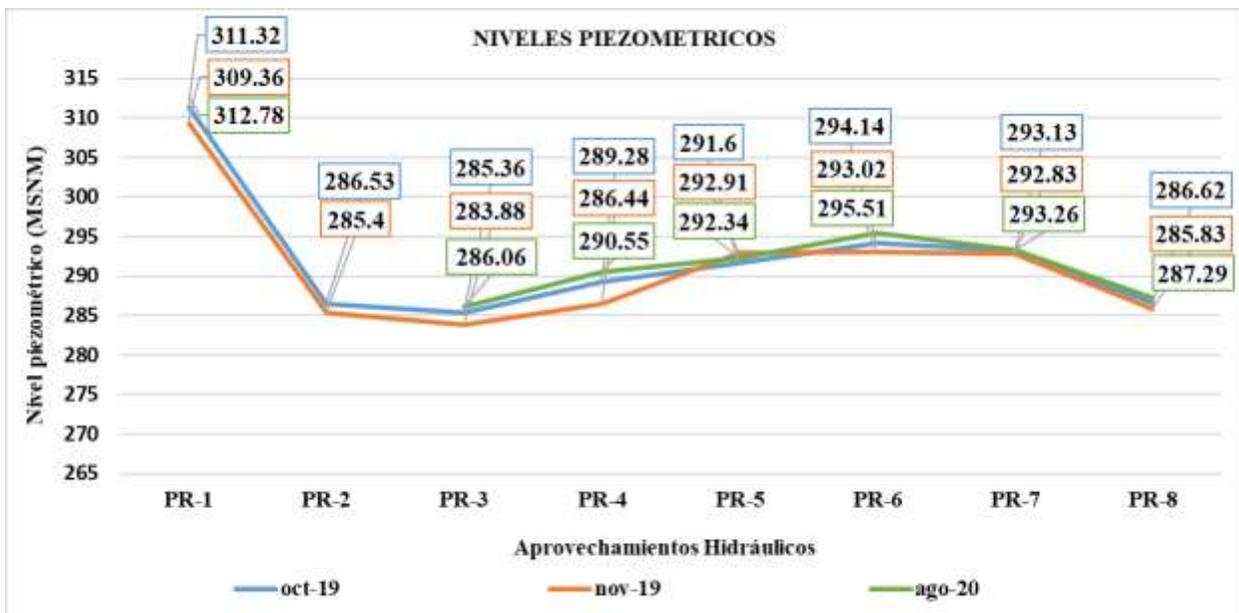


Figura 43. Niveles piezométricos durante los años 2019-2020.

5.3 Físicoquímica del Agua

5.3.1 Parámetros Físicoquímicos

Se realizó un análisis físicoquímico para determinar los factores que influyen directamente en la calidad del agua superficial y subterránea. Conductividad, Temperatura y pH son parámetros que se midieron in-situ. Fosforo, Alcalinidad total como CaCO_3 , Nitrógeno Total, Demanda química de Oxígeno (DQO) y Sólidos son parámetros que se determinaron en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental en el Instituto de Ingeniería Civil.

Se realizó una comparación entre diversas Normas Nacionales e Internacionales para evaluar la calidad del agua en la zona de estudios. Se dividieron los aprovechamientos hidráulicos en agua subterránea y agua superficial.

5.3.2 Agua subterránea

Conforme a la comparación frente a las Normas Nacionales e Internacionales con las que se evaluaron los resultados obtenidos para determinar la calidad actual del agua subterránea, se encontró que parámetros como conductividad, fosfatos, alcalinidad como CaCO_3 , DQO y SDT, sobrepasaron por lo menos una de las normas en alguna o todas las muestras analizadas para fines de potabilidad y de uso urbano y de riego.

Se realizaron dos muestreos los cuales se llevaron a cabo los días 30 de noviembre del 2019 y 28 de agosto del 2020, las dos fechas corresponden a periodos de lluvia ordinario-sequia.

5.3.2.1 pH

El pH del agua es un indicador de la calidad del agua, en la Figura 44, se presentan los resultados obtenidos de pH de los aprovechamientos hidráulicos en las dos campañas de muestreo. Los valores de pH de las dos campañas de muestreo oscilaron entre los 6.4 a 8.3 y 6.5 a 7.5, respectivamente para el primer y segundo muestreo. Este pH es característico de suelos Castañozem constituidos principalmente por caliche (INEGI, 2009; PDUCP, 2015).

Para el caso de la segunda campaña se destaca que los pozos PR-1, PR-5, PR-6 y la noria PR-7 presentaron un pH neutro. Solo en los pozos PR-3 y PR-4 se tiene

una acidificación del agua. Este comportamiento del pH está dentro del intervalo del pH de las aguas subterráneas que es 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 están dentro de los LMP.

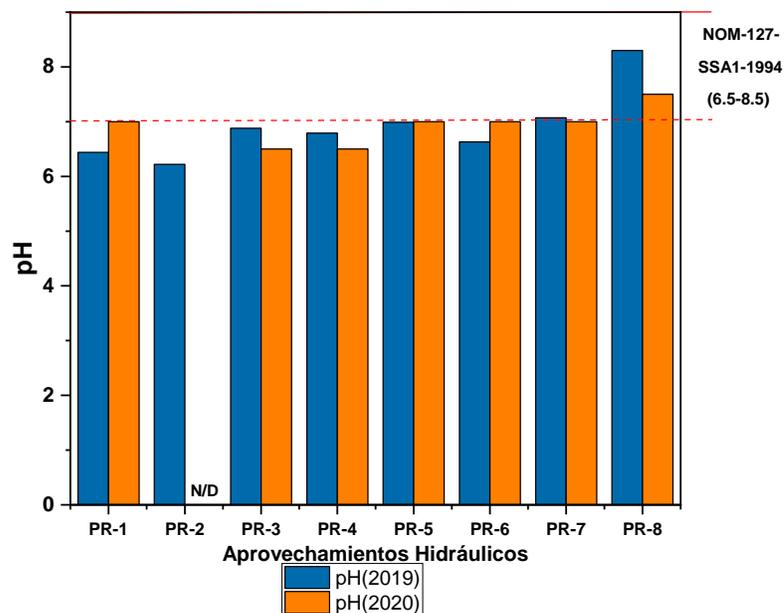


Figura 44. Resultados de pH (In-Situ) de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).

5.3.2.2 Temperatura

Como parte de la caracterización física de las muestras de agua se midieron diferentes aprovechamientos hidráulicos se midió la temperatura de 6 pozos y 2 norias. Durante la primera campaña de muestreo la temperatura osciló entre el intervalo de 24.4 °C a 26.5 °C en los diferentes aprovechamientos hidráulicos, remarcando que estos valores fueron muy próximas a la temperatura ambiente porque es agua que se encuentra interactuando con las variaciones climatológicas del medio ambiente.

Es necesario conocer el parámetro de temperatura ya está 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).

En el segundo muestreo se presentaron valores muy similares a la primera campaña. En la Figura 45, se muestran los resultados de la temperatura correspondiente a las 2 campañas de muestreo, se observa que la temperatura de las aguas subterráneas varió muy poco. La poca variabilidad responde a que la temperatura está ligada a la media anual de las temperaturas atmosféricas del lugar (Custodio y Llamas, 1996). En nuestra área de estudio, la temperatura media anual es de 22.5°C (INEGI, 2019).

A su vez, la temperatura de las aguas subterráneas depende de las características del terreno que drenan, pudiendo ser influenciada, entre otras causas, por la naturaleza de las rocas, siendo además función de la profundidad (Catalán, 1969).

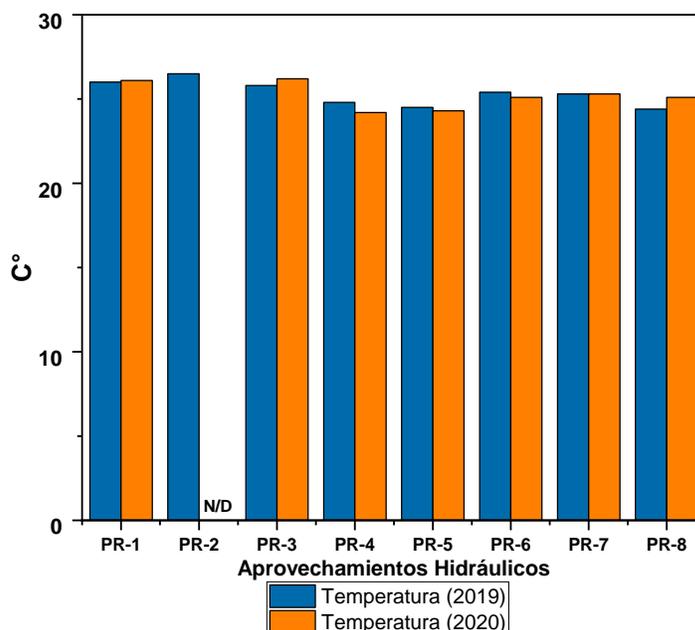


Figura 45. Resultados de Temperatura (In-Situ) de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).

5.3.2.3 Conductividad

En la Figura 46, se presentan los resultados correspondientes a las dos campañas de muestreos de todos los aprovechamientos hidráulicos.

Los valores de conductividad en la primera campaña de muestreo oscilaron entre el intervalo 5573 a 7878 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Destacando que los valores más elevados se encontraron en el pozo PR-5 con un valor de 6493 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y la noria PR-8 con un valor de 7878 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Los valores de conductividad en parte están asociados a los estratos geológicos de la zona de estudio correspondiente a suelos calcáreos, lo que genera una concentración elevada de sales. Sin embargo, la temperatura y el pH contribuyen a la disolución de las rocas a través de los diferentes procesos hidrogeoquímicos en el subsuelo. Además, las concentraciones altas de contaminantes de hidrocarburos.

Para la segunda campaña se presentaron valores entre los 5586 a 8624 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Destacando que los valores más elevados se encontraron en la segunda campaña de muestreo para los pozos PR-1, PR-3, PR-4, PR-6 y las norias PR-7 y PR-8, solo el pozo PR-5 presento mayor conductividad en el segundo muestreo. Destacando que en los dos muestreos la noria PR-8 presenta los valores más elevados. Esto se atribuye a que la noria PR-8 se encuentra al Sureste de la refinería y las direcciones del flujo del agua subterránea van dirigidas de Noroeste a Sureste.

Sin embargo, para los 8 aprovechamientos hidráulicos evaluados, se tiene que la conductividad del agua es salobre posiblemente a la presencia de rocas calizas presentes en el área de estudios (Véase Tabla 5).

Tabla 5. Clasificación de aguas naturales por su conductividad eléctrica (APHA, 1995); Claudio Gómez, O. G., 2018).

Clasificación del tipo de agua	Conductividad ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)
Agua Potable	100-2,000
Agua Salobre	2.000-5,000
Agua Marina	5.000-45,000
Salmuera	45,000-100,000

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. La medida de la conductividad tiene varias aplicaciones en aguas naturales, una de las más importantes es la evaluación de las variaciones de la concentración de minerales disueltos en aguas naturales y residuales (Ecofluidos Ingenieros, S. A.,2012). De ahí, que organismos regulen parámetros fisicoquímicos del agua.

De acuerdo con la OMS establece para agua potable un Límite máximo permisible (LMP) de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras el Real Decreto 140/2003 establece un LMP de 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

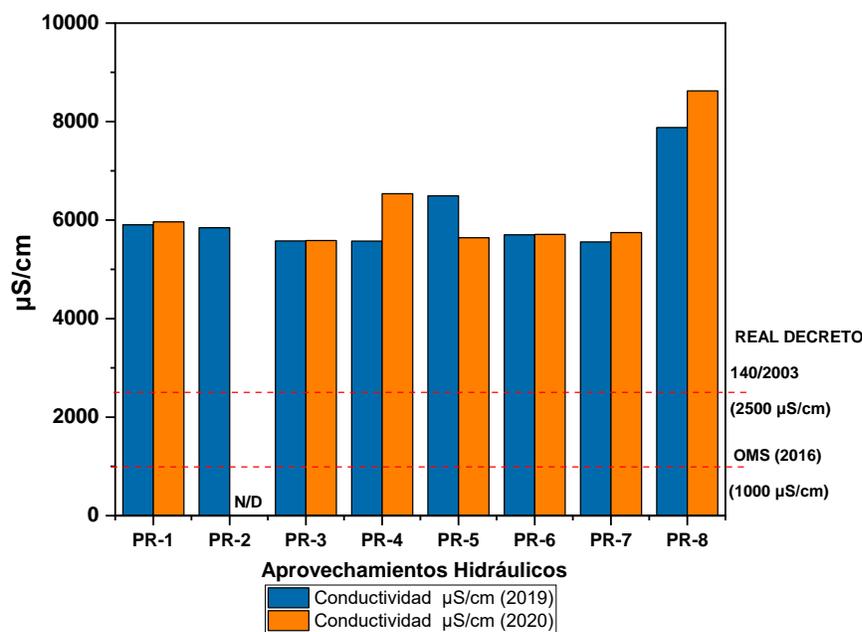


Figura 46. Resultados de Conductividad (In-Situ) de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).

5.3.2.4 Fosfatos

En la Figura 47, se presentan los resultados de fosfatos correspondientes a las dos campañas realizadas. Los valores de fosfatos en la primera campaña de muestreo oscilaron entre el intervalo de 0.16 mg/L a 42.08 mg/L. Destacando que el pozo PR-4 y la noria PR-7 presenta valores superiores de 1 mg/L. Para el segundo muestreo

todas las muestras mostraron un comportamiento más homogéneo en el intervalo de 0.1 mg/L a 0.70 mg/L.

De acuerdo con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua en las dos campañas de muestreos todos los valores sobrepasaron los LMP, (a excepción del pozo PR-3 en el cual no se detectaron fosfatos). De los dos muestreos, con un valor de 42.08 mg/L, el pozo PR-4 del primer muestreo presentó el valor más elevado de concentración de fosfatos. Sin embargo, para el segundo muestreo la concentración fue de 0.70 mg/L. El pozo PR-4 (concentración 42.08 mg/L correspondiente a la primera campaña de muestreo) se localiza al aire libre, en una zona donde hay ganado, la concentración elevada puede provenir de constituyentes naturales del suelo y minerales, así como depósitos fecales o estiércol (Bolaños-Alfaro, *et. al.*, 2017).

El monitoreo de fosfatos y de nitrógeno es importante debido a que estos parámetros causan el crecimiento de algas y cianobacterias (estas producen diferentes toxinas) (Sawyer *et. al*, 2000).

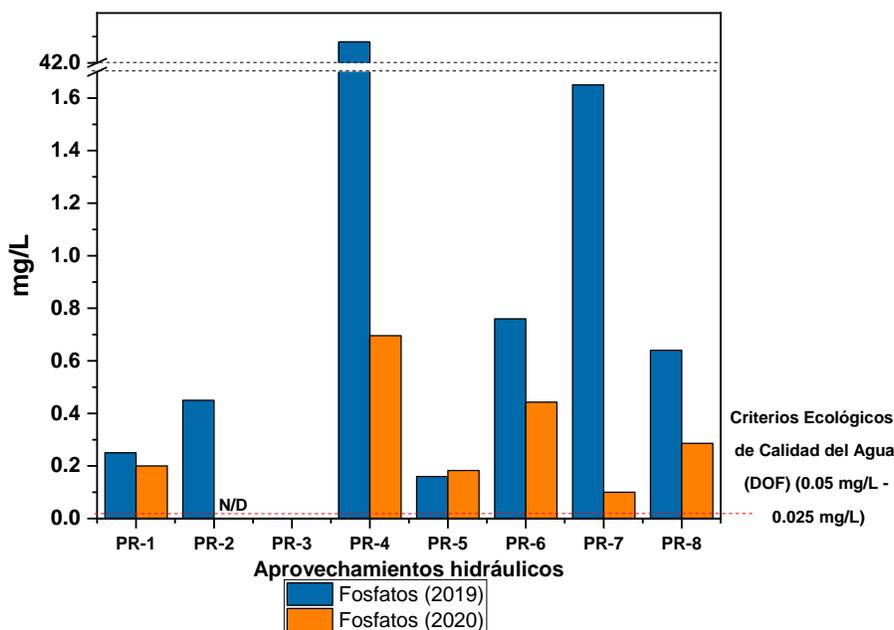


Figura 47. Resultados de Fosfatos de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).

5.3.2.5 Alcalinidad Total CaCO₃

En la Figura 49, se presentan los resultados de alcalinidad total de CaCO₃ para el conjunto de aprovechamientos hidráulicos estudiados. A partir de los cálculos obtenidos para la alcalinidad total como CaCO₃, para la primera campaña de muestreo se obtuvieron valores entre 260 mg/L a 668 mg/L.

Para el segundo muestreo, los intervalos de concentración fueron más bajos, oscilando en el intervalo de 240 mg/L a 504 mg/L confirmando la característica del agua en la zona de estudio.

La Tabla 6, muestra la clasificación de la dureza del agua en mg/l CaCO₃ según la Organización Mundial de la Salud (OMS):

Tabla 6. Clasificación de la dureza del agua en mg/L CaCO₃.

Dureza (mg/L CaCO ₃)	Tipos de agua
0-60	Blanda
61-120	Moderadamente dura
121-180	Dura
>180	Muy dura

Los resultados obtenidos en las dos campañas de muestro indican una importante dureza del agua en el área de estudio, asociada a la presencia de calcio y magnesio en proporciones muy altas.

La fuente de alcalinidad es la presencia de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos. Los carbonatos y bicarbonatos provienen del contacto del agua con el suelo. Los bicarbonatos son los compuestos que más contribuyen a la alcalinidad, puesto que se forman cantidades considerables por la acción del dióxido de carbono sobre la materia básica del suelo. La alcalinidad, por si misma, no genera ningún peligro a la salud humana, con frecuencia el ser humano se acostumbra a beber agua que excede de la norma en esa condición. Sin embargo, cuando la alcalinidad está asociada con el pH y los sólidos disueltos totales altos, puede ser perjudicial para la salud (Garza Garza, 1998; Sawyer *et. al.*, 2000).

De acuerdo con el diagrama de Bjerrum (Véase Figura 48), el agua de recarga lleva un pH ligeramente ácido como consecuencia del CO_2 que lleva disuelto, esta agua se infiltra a través de la zona de suelo encontrando minerales que se disuelven, bajo la influencia del H_2CO_3 , que a su vez es consumido por las reacciones del agua mineral. A medida que el agua nueva de los eventos de recarga pasa a través del suelo, los procesos bioquímicos e hidroquímicos en el suelo, son capaces de proporcionar un suministro continuo de acidez para promover reacciones con el agua. Chebotarev (1955) concluyó que, en la naturaleza, las aguas subterráneas tienden a evolucionar químicamente hacia la composición del agua de mar. Los cambios ocurren a medida que el agua avanza desde la zona de recarga, pasando por las zonas intermedias hasta las áreas de descarga y el agua es más antigua en tiempo geológico. Esta secuencia es causada principalmente; debido a la solubilidad y la abundancia en el subsuelo de las distintas sales (Chebotarev, 1955; Appelo y Postma, 1993).

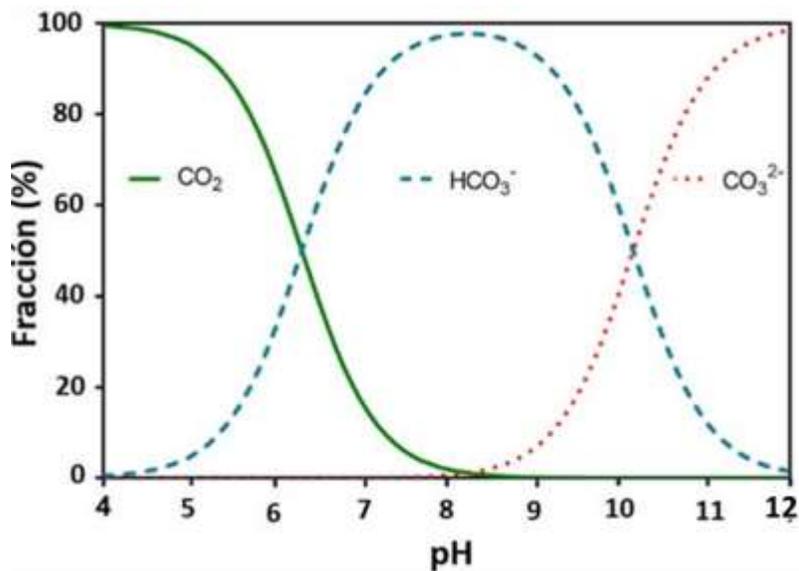


Figura 48. Diagrama de Berjum de la relación entre el pH y la proporción relativa de especies de carbono inorgánico: ($+\text{H}_2\text{CO}_3$), HCO_3^- y CO_3^{2-} en las aguas naturales (Schwarzenbach y Meier, 1958).

De acuerdo a la Figura 49, se observa que los LMP establecidos por Los Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua establecen una concentración máxima permisible de 400 mg/L para fuentes de abastecimiento de agua potable. Por lo que

observamos que los pozos PR-1, PR-3, PR-4 y PR-6 superan en uno o en ambos muestreos los LMP establecidos.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la primera campaña de muestreo la dureza del agua varió desde aguas arriba sobre la refinería de 464.5 mg/L a aguas abajo de 259.53 mg/L, en la segunda campaña de muestreo el comportamiento fue similar. Esto puede deberse a que parte del agua de las lluvias, se infiltra y a su vez va disolviendo minerales de las rocas, principalmente calcio, magnesio y bicarbonatos, por lo que al seguir el agua infiltrándose y siguiente el flujo, el agua subterránea va concentrando estas sales.

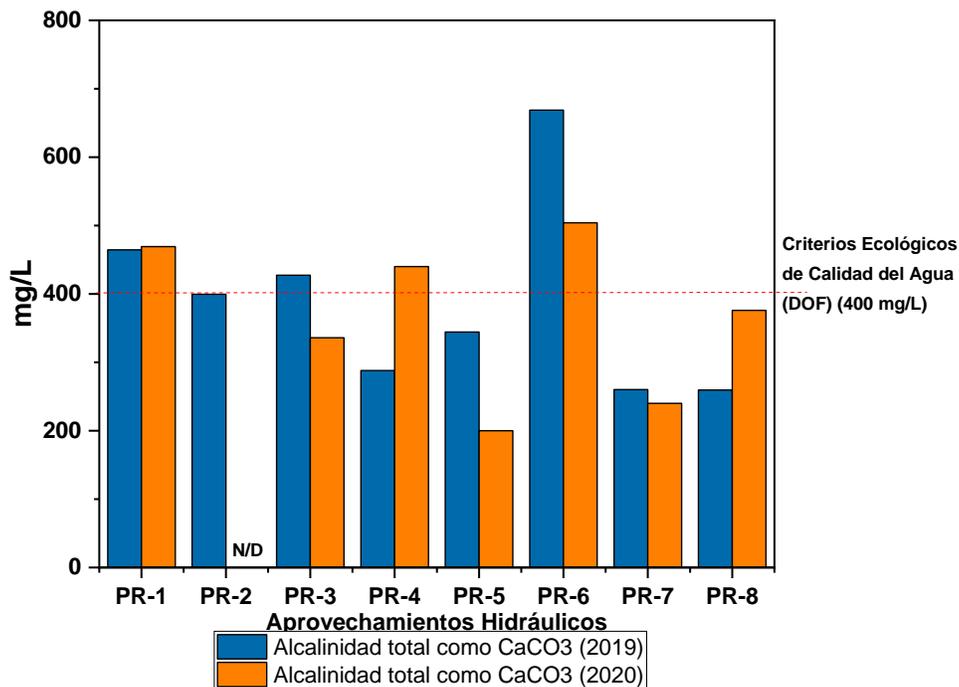


Figura 49. Resultados de Alcalinidad Total CaCO₃ de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).

5.3.2.6 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

50, se presentan los resultados de NT correspondiente a las dos campañas de muestreo de los aprovechamientos hidráulicos.

En la primera campaña de muestreo los valores de NT oscilaron entre los 1.93 mg/L a 24.91 mg/L, los valores de la segunda campaña de muestreo oscilaron entre 0.63 mg/L a 33.31 mg/L. La concentración de NT varía con el tiempo de acuerdo a la distancia, dirección y cantidad de nitrógeno transportados y con las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo (Avila, J., *et. al.*, 2002). En los dos muestreos la noria PR-8 presento los valores más elevados.

Desde que se confirmó que el agua era un vehículo para la transmisión de enfermedades se han realizado análisis de las diferentes formas del nitrógeno en aguas potables y contaminadas (APHA-AWWA-WPCF, 1989).

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, en la Norma Mexicana NOM-001-ECOL-1996 y PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017 se establecen valores para uso urbano y de riego de 40 mg/L a 90 mg/L y 35 mg/L respectivamente. Dentro del área de estudios todos los aprovechamientos hidráulicos tienen valores inferiores a los LMP establecidos en las normas. La noria PR-8 presento los valores más elevados, 24.91 mg/L y 33.31 mg/L, para el primer y segundo muestreo respectivamente.

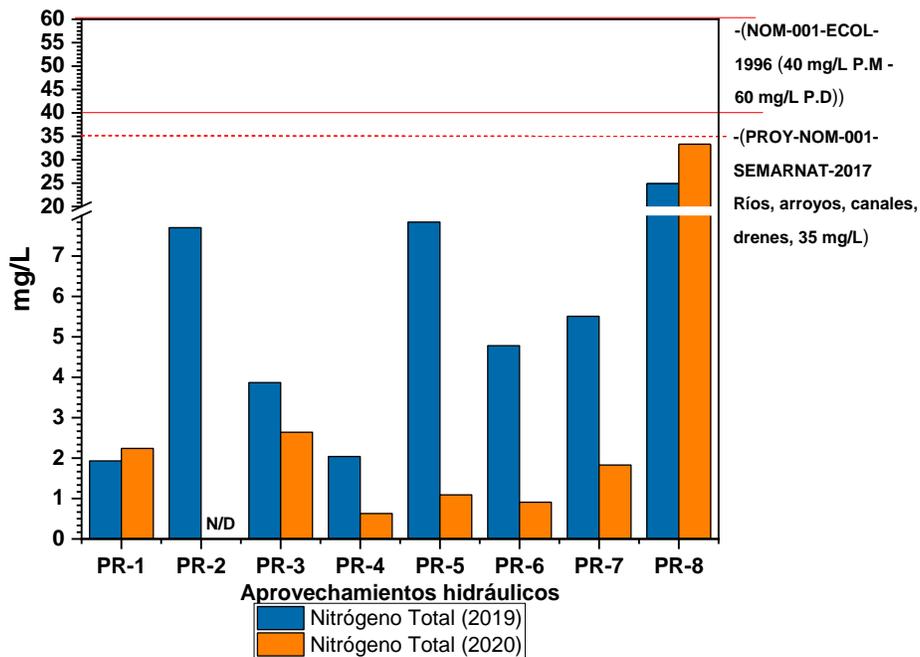


Figura 50. Resultados de NT de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).

5.3.2.7 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

En la Figura 51, se presentan los resultados de la DQO de las muestras correspondientes a agua subterránea en los aprovechamientos hidráulicos (6 pozos y 2 norias). Para el caso de la primera campaña los aprovechamientos hidráulicos en estudio presentaron valores que oscilaron entre 63.5 mg/L a 457.0 mg/L. Destacando que los puntos de muestreo que se encuentran aguas abajo en las direcciones de flujo presentan mayor DQO (noria PR7 y PR8), evidencian la evolución de los fenómenos biogeoquímicos al interior del subsuelo. Este comportamiento coincide con lo observado en los análisis de NT.

En la segunda campaña de muestreo los intervalos de concentración de DQO para las norias en estudio fueron más bajos respecto al primer muestreo, oscilando en el intervalo de 2.0 mg/L a 100.0 mg/L.

De acuerdo con el análisis bibliográfico Garza García (1998), obtuvo valores que oscilaron entre los 6.0 mg/L a 33.0 mg/L en la misma zona de estudio, lo que podemos interpretar que los valores de DQO son variables con el tiempo.

La Norma Oficial Mexicana para agua potable no establece una concentración máxima permitida de DQO en el agua subterránea. Sin embargo, la OMS (1998) lo fija en 20 mg/L (Fuentes Rivas, *et. al.*, 2015).

A su vez, en la Figura 51, se muestran los resultados evaluados con respecto a la OMS y 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.

Se observa que todos los aprovechamientos hidráulicos superan los LMP establecidos por la OMS a excepción del pozo PR-3 correspondiente a la segunda campaña de muestreo.

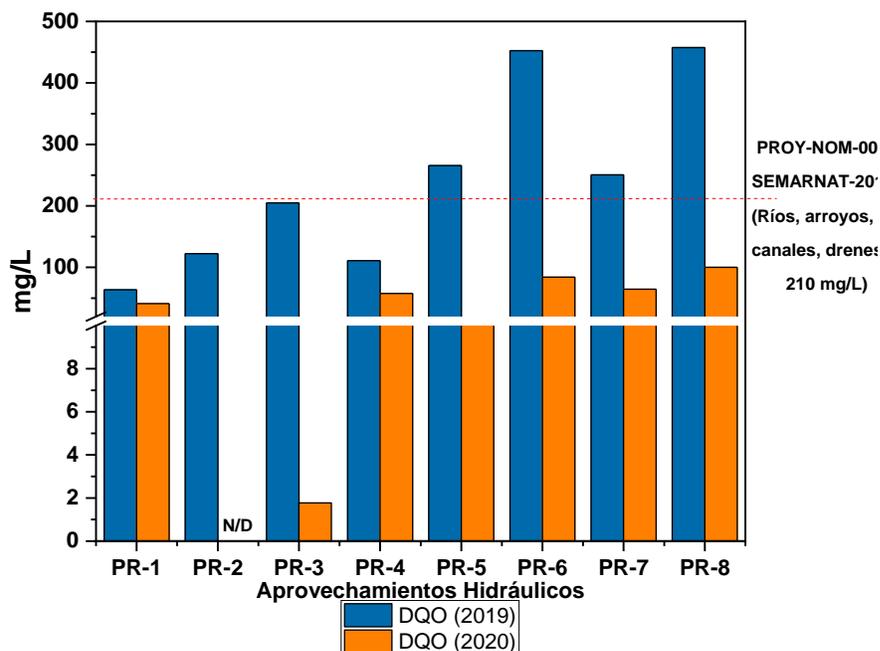


Figura 51. Resultados de DQO de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).

5.3.2.8 Sólidos Totales (ST)

Los sólidos más importantes para establecer la calidad del agua son los sólidos totales, sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos totales.

En la Figura 52, se presentan los resultados de la determinación de ST para el conjunto de aprovechamientos hidráulicos, esta determinación se llevó acabo

empleando técnicas termogravimétricas. Los resultados de las dos campañas de muestreo oscilaron entre los 575 mg/L a 3150 mg/L y 395 mg/L a 4735 mg/L, respectivamente para la primer y segunda campaña de muestreo. El conjunto de muestras no presenta variaciones de peso mayores a 5%, con excepción del punto PR-8.

La Norma Mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece un valor máximo de 1000 mg/L, para las aguas potables. Los sólidos son importantes en altas concentraciones debido a que afectan directamente sobre los procesos de tratabilidad en la etapa de filtración. En la Figura 52, se observa como los aprovechamientos hidráulicos PR-1, PR-2, PR-4 y PR-8 está muy cerca o sobrepasan el valor máximo establecido, en uno o en ambos muestreos.

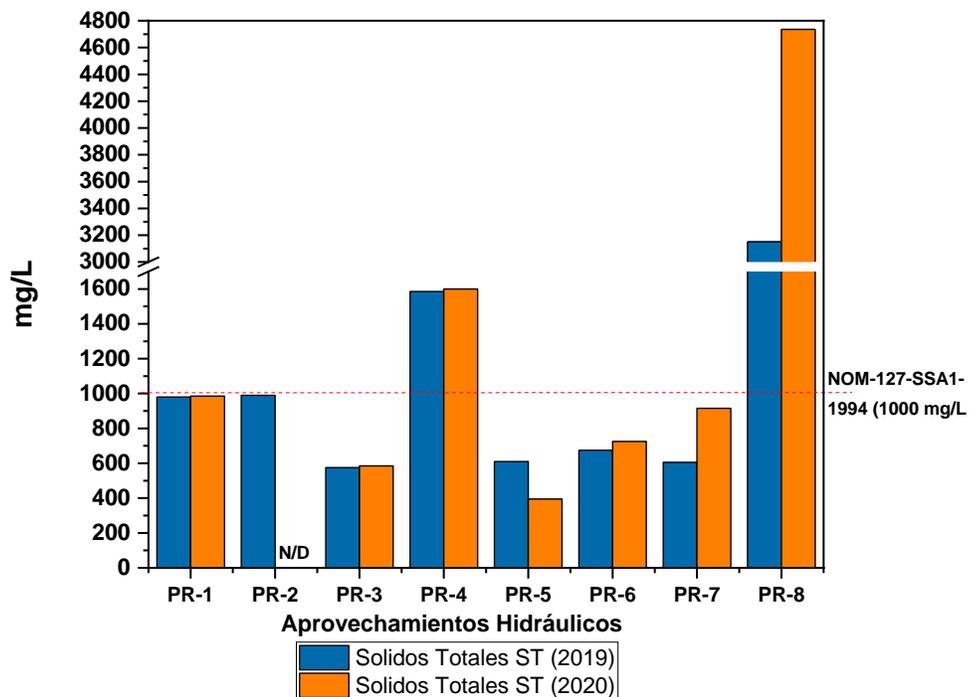


Figura 52. Resultados de ST de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).

5.3.2.9 Sólidos Suspendidos Totales (SST)

En la Figura 53, se presentan los resultados de la SST de las muestras correspondientes a agua subterránea en los aprovechamientos hidráulicos (6 pozos y 2 norias).

Se presentaron valores más altos en el primer muestreo, en el segundo muestreo no se identificaron SST en los aprovechamientos hidráulicos PR-1, PR-3, PR-4, PR-6, PR-7 y PR-8. De acuerdo a los resultados obtenidos para la primera campaña de muestreo se obtuvieron valores de SST que oscilaron entre los 6 mg/L a 47 mg/L. El único valor detectable en el segundo muestreo fue de 20 mg/L correspondiente al pozo PR-5.

De hecho, en el segundo muestreo no se identificaron SST en los aprovechamientos hidráulicos PR-1, PR-3, PR-4, PR-6, PR-7 y PR-8. El único valor detectable en la segunda campaña de muestreo fue de 20 mg/L correspondiente al pozo PR-5. Se tiene agua subterránea con bajo contenido de sólidos suspendidos, generalmente condiciones naturales.

En la Figura 53, se muestra que de acuerdo a lo establecido por la NOM-001-ECOL-1996 todos los valores analizados se encontraron por debajo de los LMP para su uso urbano y de riego.

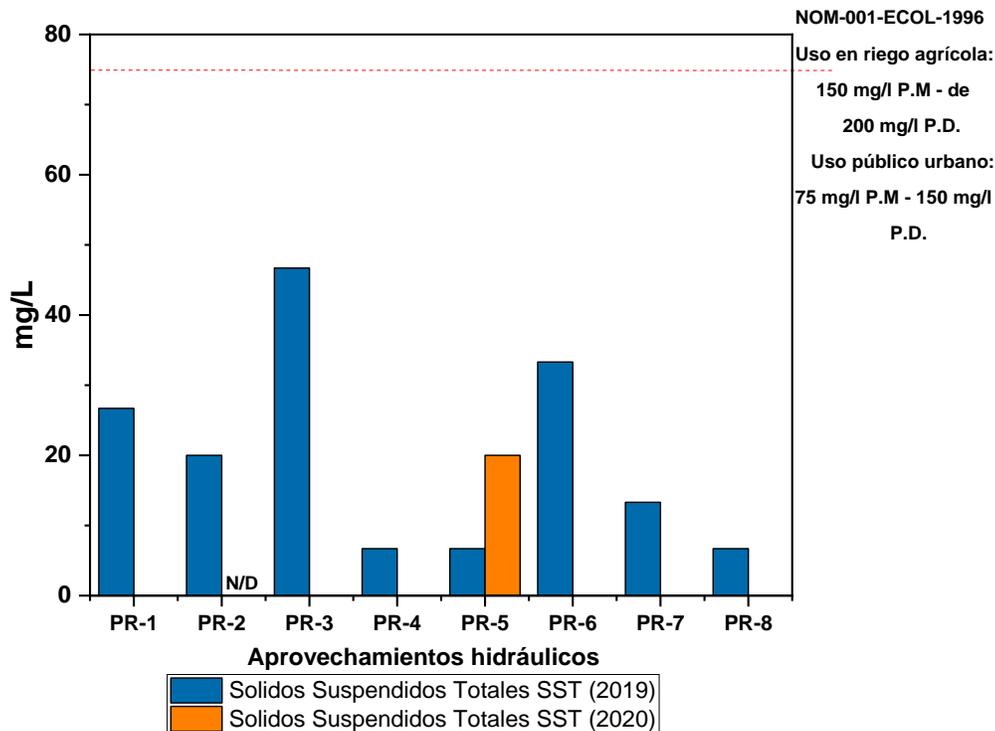


Figura 53. Resultados de SST de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).

5.3.2.10 Sólidos Disueltos Totales (SDT)

En la Figura 54, se presentan los resultados de SDT para los diferentes aprovechamientos hidráulicos evaluados en el área de estudio.

De acuerdo con la primera campaña los valores de SDT oscilaron entre los 528 mg/L a 3143 mg/L. Para el segundo muestreo los valores de SDT oscilaron entre los 528 mg/L a 3143 mg/L y 885 mg/L a 4675 mg/L, además en los dos muestreos los pozos PR-4 y la noria PR-8 presentaron los valores más elevados y que se podría asociar con las direcciones de flujo del agua subterránea, estos aprovechamientos hidráulicos sobrepasando el LMP de 1000 mg/L establecido por la Norma Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

A su vez, con la clasificación de aguas naturales (véase Tabla 7), los valores de SDT corresponden a aguas salobre, este resultado coincide con los resultados de la conductividad presentado previamente.

Tabla 7. Clasificación del agua de acuerdo a los TDS (APHA, 1995).

Clasificación	SDT (mg/L)
Agua Potable	50-1,000
Agua Salobre	1,000-10,000
Agua Marina	10,000-100,000
Salmuera	>100,000

La evolución hidrogeoquímica del agua subterránea se puede definir con base a la información de STD, los cuáles son una medida de las sales inorgánicas (Magnesio, potasio, calcio y sodio, cloruros, bicarbonatos y sulfatos) y materia orgánica en pequeñas cantidades que esta disuelta en el agua. La concentración más alta de STD corresponde a la noria PR-8, localizada al sureste de la refinería, coincidiendo con las direcciones de flujo del agua subterránea NW-SE.

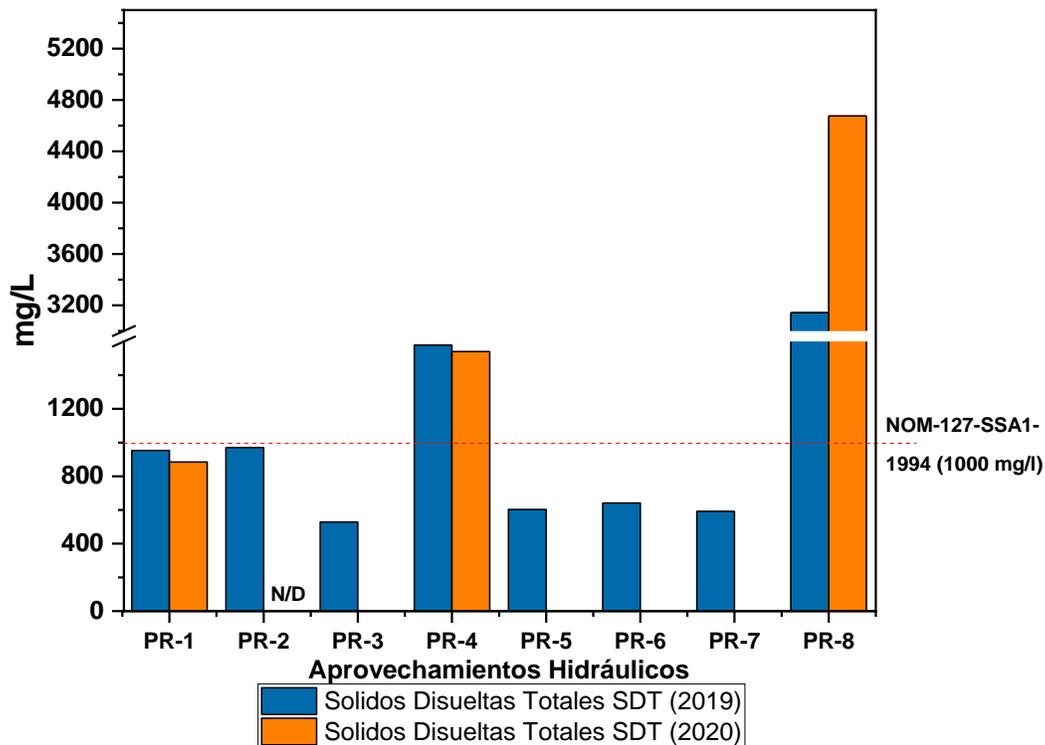


Figura 54. Resultados de SDT de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).

5.3.2.11 Sólidos Totales Volátiles (STV)

Como parte de los análisis fisicoquímicos de las muestras de agua subterránea se determinaron los sólidos totales volátiles, en la Figura 55, se muestran las dos campañas de muestreo, los análisis de la primera campaña de STV oscilaron entre los 115 mg/L a 330 mg/L. Los STV se asociado con la materia orgánica disponible y es reconocido como un sustrato potencial para crecimiento de microorganismos. Considerando que las muestras de agua corresponden al acuífero somero, es posible la presencia de la materia orgánica en descomposición.

Para la segunda campaña los valores de STV fueron en el intervalo de 125 mg/L a 690 mg/L, es decir, fueron ligeramente superior a la campaña anterior, además conservan la misma tendencia que los ST.

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.

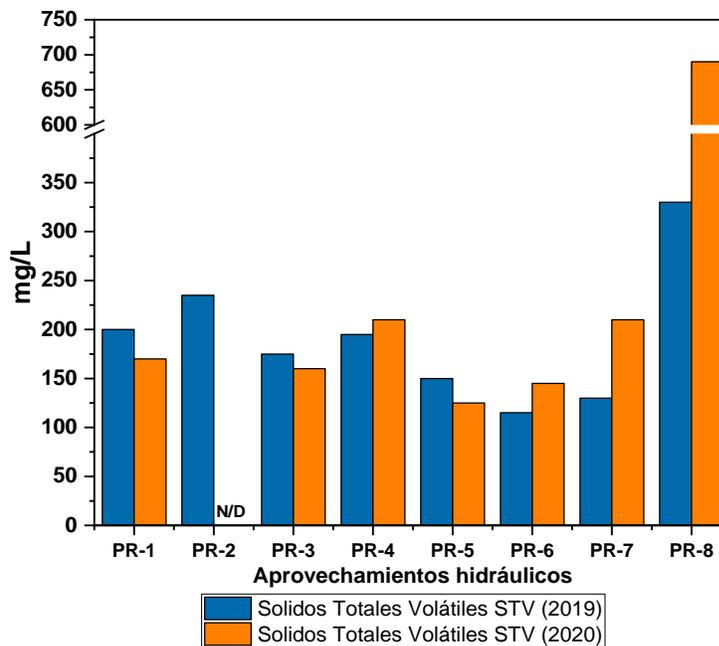


Figura 55. Resultados de STV de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas (N/D= No se determinó).

5.3.3 Agua superficial

Para el agua superficial se consideraron 5 puntos de muestreo. Sin embargo, los puntos AC-1(inicio) y AC-1(Intermedio), solo se midieron una vez, el AC-1(Inicio) en el primer muestreo correspondiente al año 2019 y el AC-1 (Intermedio) en el segundo muestreo correspondiente al año 2020. Los puntos AC corresponden a muestras tomadas en el cauce del Río San Juan. A su vez los puntos AR-1 y AR-2, corresponden a canales de agua.

5.3.3.1 pH

En la Figura 56, se presentan los resultados obtenidos de pH del agua superficial de los puntos AR-1, AR-2, AC-1 (Inicio), AR-1(Intermedio) y AR-2(Final), correspondientes a las dos campañas de muestreo. Los valores de pH de las dos campañas de muestreo oscilaron entre los 7.7 a 8.1 y 7.0 a 7.5, respectivamente para el primer y segundo muestreo.

El pH resultó tendiente a ser alcalino, aunque con cantidades muy aproximadas al valor neutro. Los valores de la conductividad eléctrica aumentaron de manera gradual, conforme se dirige de la parte alta a la parte baja de la cuenca. De acuerdo a Custodio y Llamas, 1996, para las aguas superficiales, los peces soportan valores entre los 5.0 y 9.5, sin embargo, el pH adecuado está dentro de un rango de 6.5 a 8.0, si este rango es superior o inferior, se reduce la diversidad por estrés fisiológico y la reproducción.

De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para la calidad del agua potable, se establece un rango de aceptación de 6.0 a 8.5 pH, por lo que en área de estudio, los valores obtenidos están dentro de los LMP (Véase Figura 56).

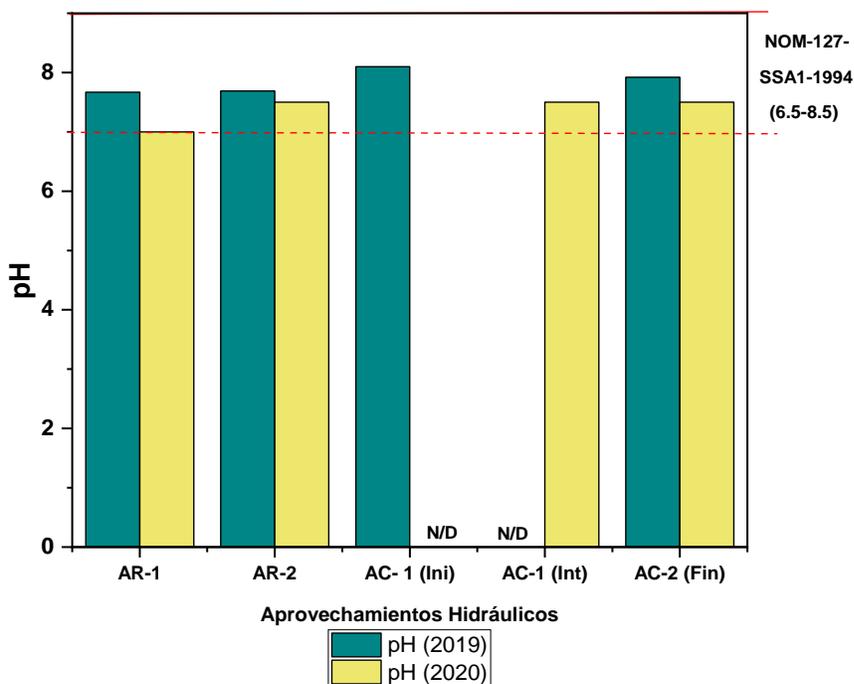


Figura 56. Resultados de pH (In-Situ) de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).

5.3.3.2 Temperatura

Se mide la temperatura del agua superficial de los puntos AR-1, AR-2, AC-1 (Inicio), AR-1 (Intermedio) y AR-2 (Final). En la Figura 57, se muestran los valores obtenidos de las dos campañas de muestreo. Durante la primera campaña de muestreo la temperatura osciló entre 18.7 C° a 24.7 C°, en la segunda campaña de muestreo se presentaron valores entre 28.1 C° a 31.7 C°. La segunda campaña de muestreo presentó los valores más altos.

Estas diferencias se presentaron debido a que la temperatura varía anualmente a consecuencia de la meteorología y del clima, la primera campaña de muestreo se realizó en otoño (22°C - 18°C, por las noches baja la temperatura) y el segundo muestreo en verano (de día 32°C y 34°C, por las noches baja la temperatura), esto marcó el aumento de temperatura en la segunda campaña de muestreo (Véase Figura 57).

Las variaciones pueden tener repercusión dentro del ecosistema fluvial, ya que determina la riqueza y abundancia de los diferentes organismos.

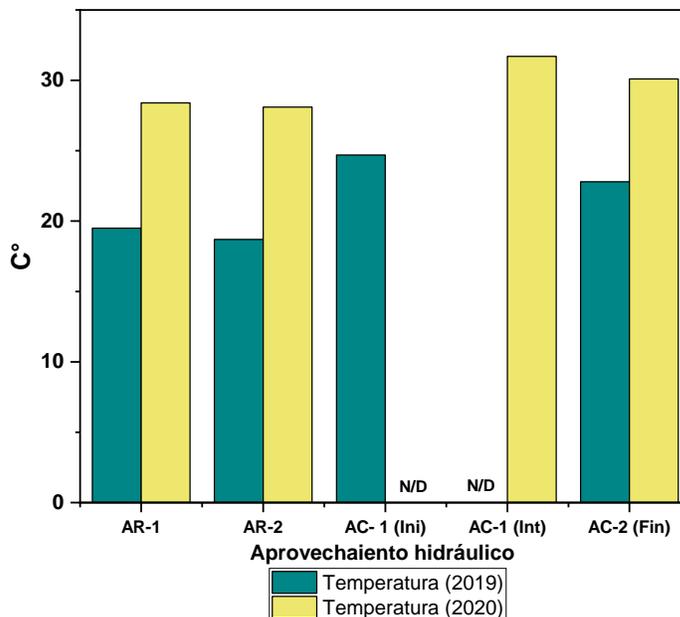


Figura 57. Resultados de Temperatura(In-Situ) de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).

5.3.3.3 Conductividad

En la Figura 58, se presentan los resultados correspondientes a las dos campañas de muestreos del agua superficial de los puntos AR-1, AR-2, AC-1 (Inicio), AR-1(Intermedio) y AR-2(Final).

Los valores de conductividad en la primera campaña de muestreo oscilaron entre los 5460 a 6138 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Para la segunda campaña de muestreo los valores oscilaron entre los 5500 a 6570 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Destacando que en las dos campañas de muestreo los valores más altos se detectaron en los canales de agua AR-1 y AR-2.

De acuerdo a la Tabla 5, menciona en la sección anterior (Agua Superficial), se tiene que el agua del área de estudios es salobre.

Los valores de conductividad en parte están asociados a los estratos geológicos de la zona de estudio correspondiente a suelos calcáreos. Además, estos valores se

atribuyen a las concentraciones altas de contaminantes de hidrocarburos, puesto que el canal AR-1 se encuentra a una distancia de aproximadamente 550 metros de la refinería y el canal AR-2 a una distancia de aproximadamente 250 metros.

El agua superficial que presenta concentraciones mayores de 1 500 mg/L de sales causan efectos sobre la biota fluvial, y en caso de que el agua sea para riego, afecta los cultivos. Si el valor sobrepasa los 2000 mg/L se reduce fuertemente la biodiversidad dentro del agua (APHA-AWWA-WPCF, 1989).

Los valores obtenidos correspondientes a los 5 puntos analizados sobrepasan lo establecido por la OMS para agua potable (1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y el Real Decreto para agua potable 140/2003 (2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

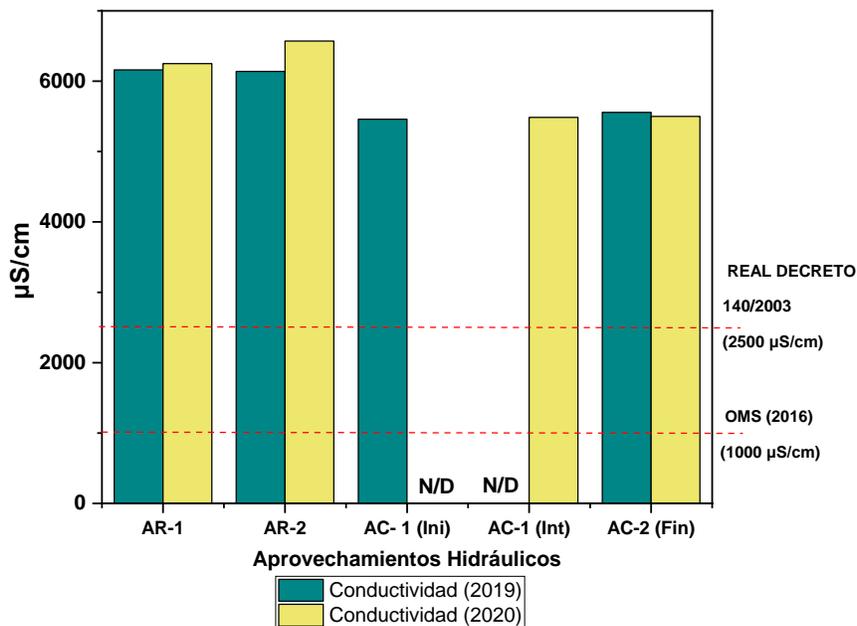


Figura 58. Resultados de Conductividad (In-Situ) de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).

5.3.3.4 Fosfatos

En la Figura 59, se presentan los resultados de fosfatos correspondientes a las dos campañas realizadas. Los valores de fosfatos en la primera campaña de muestreo oscilaron entre el intervalo de 1.33 mg/L a 7.72 mg/L. Para la segunda campaña de muestreo los valores oscilaron entre el intervalo de 0.629 mg/L a 34.86 mg/L.

Destacando que los canales de agua AR-1 y AR-2 presentaron los valores más elevados. Estos canales de agua se ubican dentro de una zona donde hay ganado, por lo que hay depósitos fecales y/o estiércol, estos desechos son contaminación que es arrastrada por las lluvias hacia las acequias, canales, arroyos y ríos (Bolaños-Alfaro, *et. al.*, 2017).

De acuerdo con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua en los dos muestreos todos los valores sobrepasan los LMP (Véase Figura 59).

Este parámetro es muy importante para evaluar la productividad biológica potencial de las aguas superficiales. Las determinaciones de fosfatos son esenciales en el funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas y en los estudios de contaminación de las corrientes ya que altas concentraciones de fosfatos pueden producir la eutrofización (Mejia, W., *et. al.*, 2007).

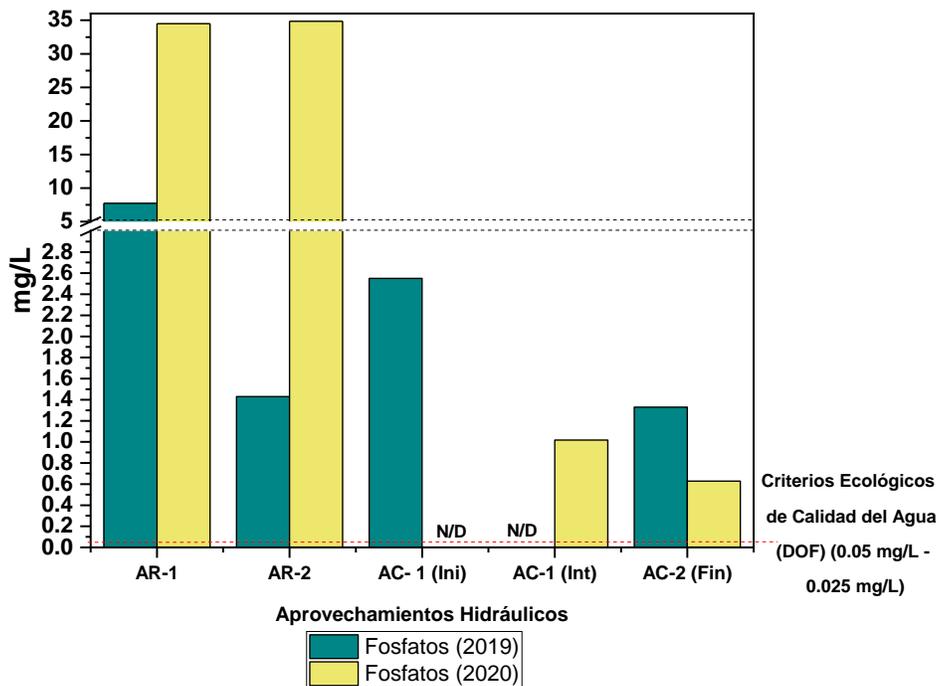


Figura 59. Resultados de Fosfatos de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).

5.3.3.5 Alcalinidad Total CaCO_3

En la Figura 60, se presentan los resultados de alcalinidad total de CaCO_3 para los puntos AR-1, AR-2, AC-1 (Inicio), AR-1(Intermedio) y AR-2(Final). A partir de los cálculos obtenidos para la alcalinidad total como CaCO_3 , para la primera campaña de muestreo se obtuvieron valores que oscilaron entre 204.8 mg/L a 297.3 mg/L. Para la segunda campaña de muestreo los intervalos de concentración fueron más bajos, oscilaron entre los 184.0 mg/L a 216.0 mg/L.

De acuerdo a la clasificación de la OMS (Véase la Tabla 5, mencionada en la sección anterior), se tiene que en el área de estudio se tiene agua muy dura.

En la Figura 60, se observan los LMP establecidos por Los Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua el cual establece una concentración máxima permisible de 400 mg/L para fuentes de abastecimiento de agua potable. Dentro del área de estudio todos los aprovechamientos hidráulicos tienen valores inferiores a los LMP.

La alcalinidad del agua superficial es principalmente una función del contenido de hidroxilos, carbonatos y bicarbonatos (calcio, sodio, potasio y magnesio), es un indicador de la concentración de estos contribuyentes (Sawyer *et. al.*, 2000).

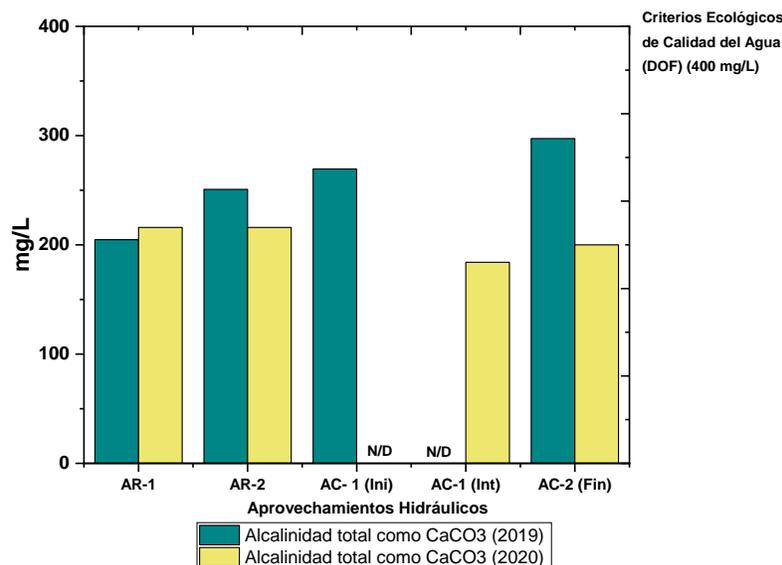


Figura 60. Resultados de Alcalinidad total como CaCO_3 de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).

5.3.3.6 Nitrógeno Total (NT)

En la Figura 61, se presentan los resultados de NT correspondiente a las dos campañas de muestreo de los puntos AR-1, AR-2, AC-1 (Inicio), AR-1(Intermedio) y AR-2(Final).

En la primera campaña de muestreo los valores de NT oscilaron entre los 10.03 mg/L a 13.95 mg/L. En la segunda campaña de muestreo los valores oscilaron entre 1.54 mg/L a 6.77 mg/L Destacando que en la primera campaña de muestreo los canales AR-1 y AR-2 presentaron los valores más elevados.

La Norma Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para agua potable no establece el parámetro de NT. Sin embargo, la Norma Mexicana NOM-001-ECOL-1996 y PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017 establece valores para uso urbano y de riego de 40 mg/L a 90 mg/L y 35 mg/L respectivamente. Dentro del área de estudio todos los aprovechamientos hidráulicos tienen valores inferiores a los LMP establecidos en las normas.

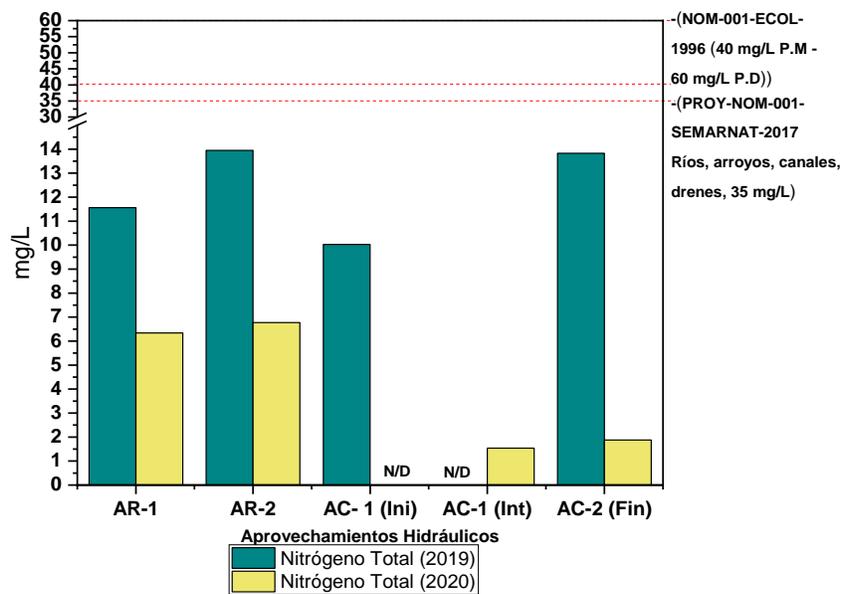


Figura 61. Resultados de Nitrógeno Total de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).

5.3.3.7 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

En la Figura 62, se presentan los resultados de la DQO correspondiente a las dos campañas de muestreo de los puntos AR-1, AR-2, AC-1 (Inicio), AR-1(Intermedio) y AR-2(Final).

En la primera campaña de muestreo se presentaron valores que oscilaron entre los 924.2 mg/L a 1295.33 mg/L. En la segunda campaña de muestreo los valores oscilaron entre 28.52 mg/L a 161.46 mg/L. Destacado que en los dos muestreos los canales de agua AR-1 y AR-2 presentaron valores elevados.

Este comportamiento coincide con lo observado en los análisis de NT.

El proyecto de modificación de la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017 establece un LMP para ríos, arroyos y canales de 210 mg/L. En la Figura 62, se observa que solo los valores correspondientes al primer muestreo sobre pasan los LMP establecidos.

Por otra parte, para agua superficial la CONAGUA utiliza el parámetro de DQO como indicador de la presencia de sustancias provenientes de descargas no municipales, para esto tiene una categoría que va desde excelente (<10.0 mg/L), buena calidad (>10.0 mg/L y <20.0 mg/L), aceptable (>20.0 y <200 mg /L) a fuertemente contaminada (>200 mg/L). De acuerdo a esta clasificación los diferentes aprovechamientos evaluados presentan agua contaminada. Lo que puede ser un indicador de las descargas o vertedero de aguas residuales provenientes de la refinería.

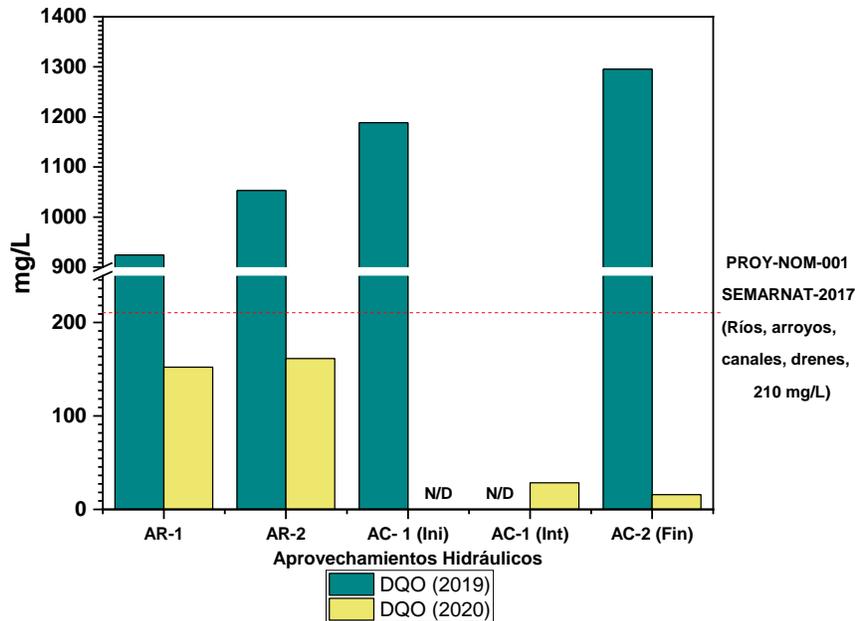


Figura 62. Resultados de DQO de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).

5.3.3.8 Sólidos Totales (ST)

En la Figura 63, se presentan los resultados de la DQO correspondiente a las dos campañas de muestreo de los puntos AR-1, AR-2, AC-1 (Inicio), AR-1(Intermedio) y AR-2(Final).

Los resultados de las dos campañas de muestreo oscilaron entre los 550 mg/L a 1175 mg/L y 505 mg/L a 1365 mg/L, respectivamente para la primera y segunda campaña de muestreo. Los valores de ST mantuvieron el mismo comportamiento, solo que se presentaron valores más bajos en el primer muestreo, a excepción del punto AC-2 (Final), que presentó mayor concentración en el primer muestreo. Destacando que en las dos campañas los canales de agua AR-1 y AR-2 presentaron los valores más elevados.

La Norma Mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece un valor máximo de 1000 mg/L, para las aguas potables. En la Figura 63, se observa como en las dos campañas de muestreo los canales de agua AR-1 y AR-2 sobrepasan el valor máximo establecido.

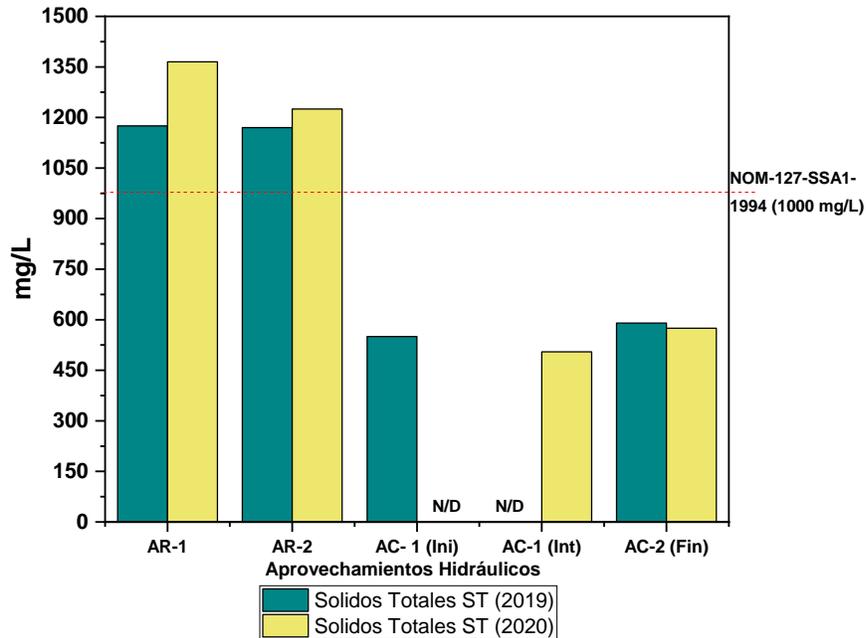


Figura 63. Resultados de Sólidos Totales de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).

5.3.3.9 Sólidos Suspendidos Totales (SST)

En la Figura 64, se presentan los resultados de la DQO correspondiente a las dos campañas de muestreo de los puntos AR-1, AR-2, AC-1 (Inicio), AR-1(Intermedio) y AR-2(Final).

En la primera campaña de muestreo los SST oscilaron entre 6.7 mg/L a 33.3 mg/L. Sin embargo, para el segundo valor no se determinaron valores de SST. Se tiene agua superficial con bajo contenido de sólidos suspendidos, generalmente condiciones naturales.

Para agua superficial, el parámetro como SST no tiene un valor establecido por la Norma Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para agua potable, sin embargo, en la Norma Mexicana NOM-001-ECOL-1996 se establecen valores para uso urbano y de riego (Véase Figura 64). A su vez, la CONAGUA, utiliza el parámetro de SST como un indicador de calidad del agua, ya que atribuyen que los SST provienen principalmente de aguas residuales y de la erosión del suelo.

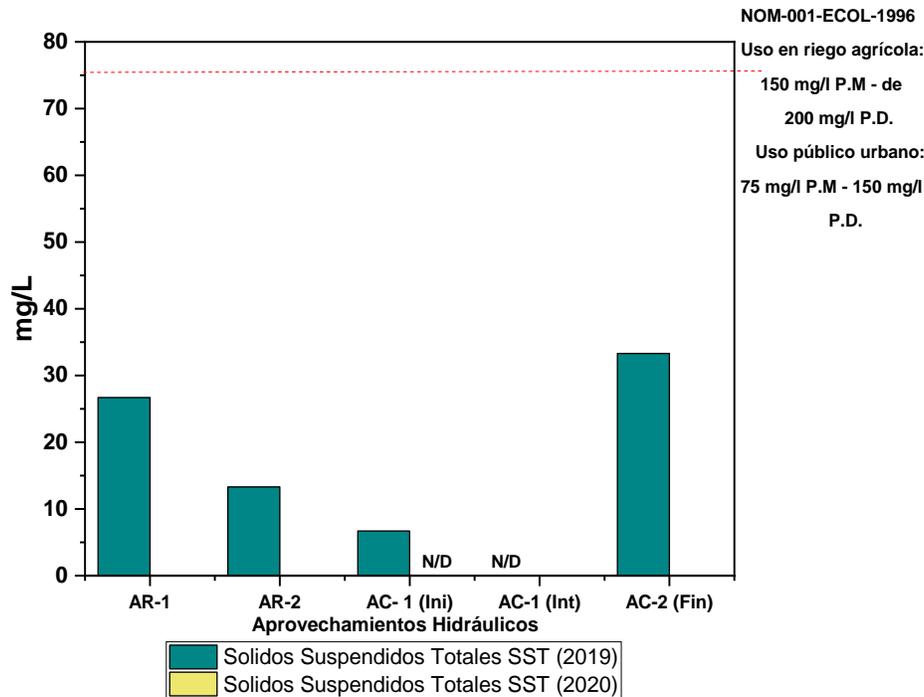


Figura 64. Resultados de SST de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).

5.3.3.10 Sólidos Disueltos Totales (SDT)

En la Figura 65, se presentan los resultados de la DQO correspondiente a las dos campañas de muestreo de los puntos AR-1, AR-2, AC-1 (Inicio), AR-1(Intermedio) y AR-2(Final).

De acuerdo con la primera campaña los valores de SDT oscilaron entre los 543.3 mg/L a 1156.7 mg/L. Para la segunda campaña de muestreo solo se obtuvo la presencia de SDT en el canal AR-2.

La Norma Mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece un valor máximo de 1000 mg/L, para las aguas potables (Véase Figura 65).

Los canales de agua AR-1 y AR-2 sobrepasaron los LMP en uno o en ambos muestreos, estos coinciden con los resultados de la conductividad presentado previamente. Además, conservan la misma tendencia que los ST. A su vez, con la clasificación de aguas naturales (véase Tabla 7, correspondiente a la sección anterior), los valores de SDT en los canales de agua AR-1 y AR-2 presentan valores

mayores a los 1000 mg/L lo cual corresponde a aguas salobre, este resultado coincide con los resultados de la conductividad presentado previamente.

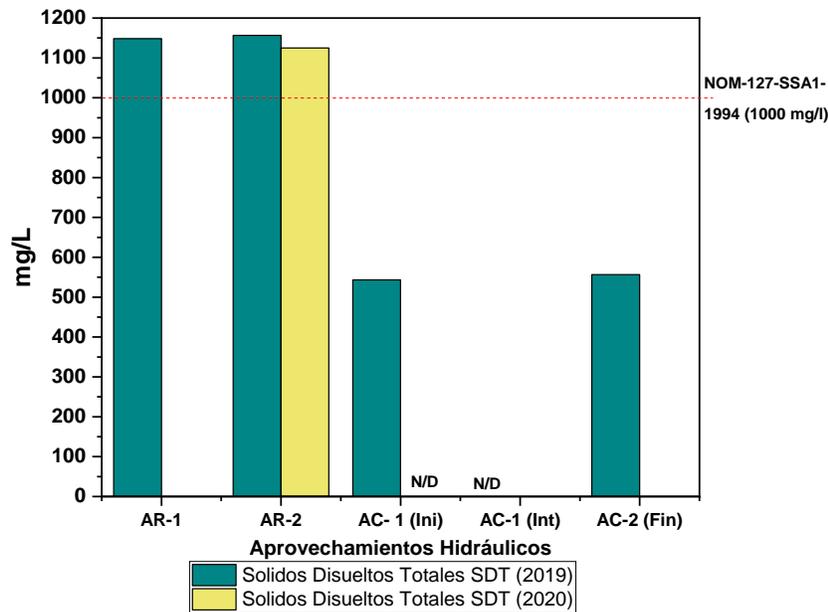


Figura 65. Resultados de SDT de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).

5.3.3.11 Sólidos Totales Volátiles (STV)

En la Figura 66, se presentan los resultados de STV correspondiente a las dos campañas de muestreo de los puntos AR-1, AR-2, AC-1 (Inicio), AR-1(Intermedio) y AR-2(Final).

En la primera campaña de muestre los valores de STV oscilaron entre los 135 mg/L a 195 mg/L. Para la segunda campaña de muestre los valores oscilaron entre 100 mg/L a 220 mg/L, es decir, fueron ligeramente superior a la campaña anterior, además conservan la misma tendencia que los ST.

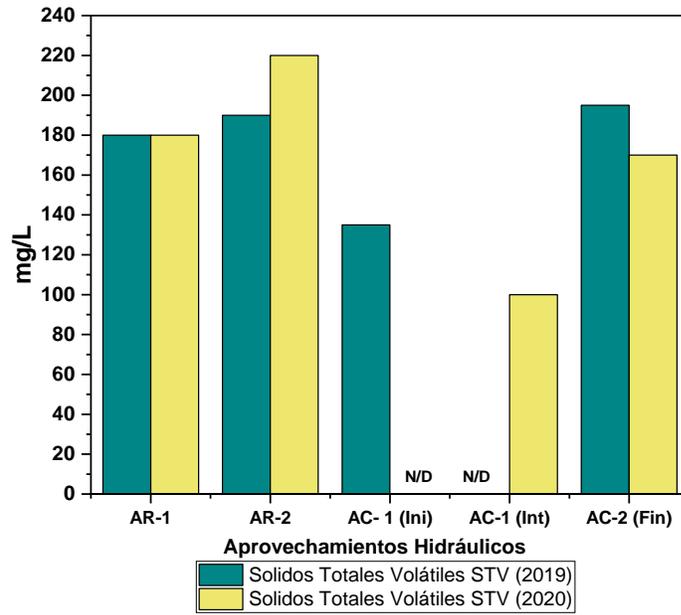


Figura 66. Resultados de STV de los aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las 2 campañas de muestreo realizadas para agua superficial (N/D= No se determinó).

5.4 Cromatografía de Gases

5.4.1 Análisis de Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno (BTEX).

De acuerdo a la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA), los compuestos BTEX son contaminantes prioritarios. Estos compuestos a menudo están en el aire, suelo y agua.

El comportamiento de los BTEX, está dado por sus propiedades fisicoquímicas, tales como solubilidad, coeficiente de distribución octanol/agua, constante de la Ley de Henry, coeficiente de sorción y presión de vapor, las cuales a su vez están relacionadas con su peso molecular. Estas características están relacionadas con su transporte y destino, también están íntimamente relacionadas entre sí y junto con las características del subsuelo marcan el comportamiento individual de cada BTEX (Véase Tabla 8).

Tabla 8. Características fisicoquímicas de los BTEX.

Características	Benceno	Tolueno	Etilbenceno	Xileno
Peso Molecular (g/mol)	78.11	92.14	106.17	106.2
Solubilidad en agua a 20-25°C (mg/L)	1750	526	169	198
log (K _{OW}) Coeficiente de distribución octanol/ agua	2.1	2.8	3.1	3.3
k _{oc} Coeficiente de sorción cm ₃ /g	59	180	360	240
Constante de la Ley de Henry (adimensional)	0.228	0.272	0.323	0.290
Presión de vapor (a 20-25°C) (mm Hg)	95	28	9.6	8.8

*(Saval, S., et.al., 2004, Navarro, B., et. al. 2018)

El análisis de BTEX se llevó a cabo solo una vez, durante la segunda campaña de muestreo, realizada en agosto del 2020. Los resultados obtenidos de los diferentes aprovechamientos hidráulicos se compararon con agencias regulatorias internacionales, en la Tabla 9, se mencionan las agencias regulatorias y los límites máximos permisibles (LMP) 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 9. Límites Máximos Permisibles para BTEX

Límites máximos permisibles para BTEX en agua potable por distintas agencias regulatorias internacionales.		
Agencias regulatorias	Parámetros (ppm)	
	Benceno	Tolueno
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

5.4.2 Agua subterránea

5.4.2.1 Benceno

En la Figura 67, se presentan los resultados de benceno para agua subterránea de los aprovechamientos hidráulicos, PR-1, PR-3, PR-4, PR-5 y PR-6 corresponden a pozos de agua, PR-7 y PR-8 corresponden a norias. Los valores obtenidos de los diferentes aprovechamientos hidráulicos oscilaron entre 0.06 ppm a 1.43 ppm.

Los resultados respecto al análisis de benceno en el agua subterránea, recolectada de los pozos y norias, indica que todos los aprovechamientos hidráulicos exceden los LMP respecto a las normas nacionales e internacional (Véase Tabla 9).

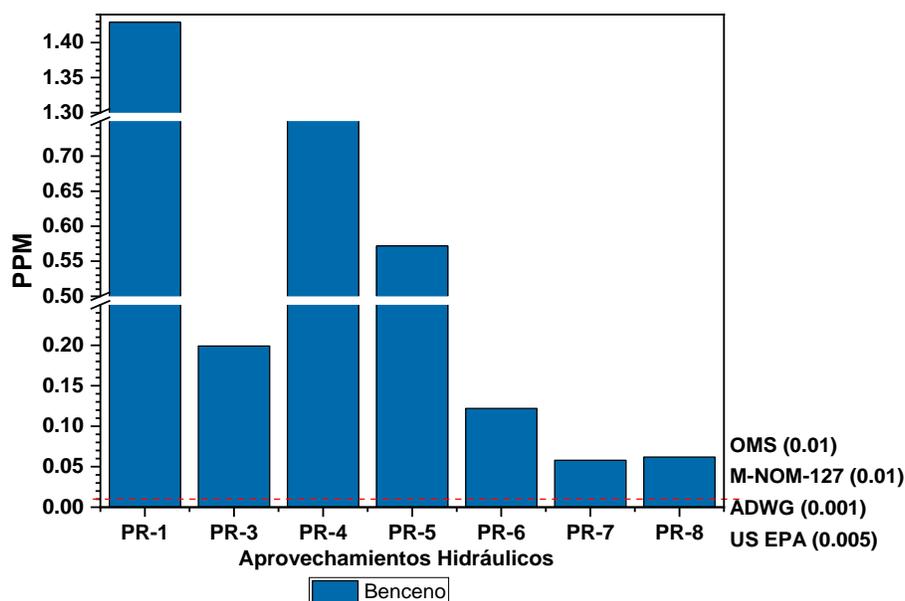


Figura 67. Concentración en ppm de benceno.

Generalmente los distintos aprovechamientos hidráulicos localizados en zonas cercanas a la exploración, producción y/o refinación de hidrocarburos presentaran concentraciones de hidrocarburos y sus derivados.

Goss *et. al.* (1998) investigaron la concentración de compuestos BTEX en pozos domésticos de granjas, a menudo utilizados como fuentes de agua potable, destacaron que alrededor del 40% de los pozos investigados contenían uno o más de los contaminantes BTEX en concentraciones que excedían el límite normal (0.001 ppm en la mayoría de las guías europeas de agua potable) (Fayemiwo, O., *et. al.*, 2017). Por su parte Serrano *et. al.*, (2007), reportaron concentraciones en muestras de agua potable, de benceno entre 0.001 ppm y 0.03 ppm, que exceden los límites aceptables reportados. Respecto al área de estudio se obtuvo un valor promedio de 0.465 ppm, una mínima de 0.058 ppm (noria PR-7) y una máxima de 1.429 ppm (pozo PR-1). Entre los valores arriba del promedio se encontraron los pozos PR-4 y PR-5.

Como se mencionó en la sección de hidrogeología, el nivel piezométrico (msnm) más alto corresponde al pozo PR-1 (312.78 msnm) y el nivel más bajo pertenecen a la noria PR-8 (287.29 msnm), aunado a esto en el área de estudio se tiene una dirección preferencial del flujo del agua subterránea de Noroeste a Sureste. Referente a las concentraciones detectadas se observa que las concentraciones van disminuyendo conforme avanza el flujo del agua subterránea identificado (Véase Figura 68). Sin embargo, en el Norte de la zona de estudio hay unas líneas de flujo que van de Noroeste a Noreste (Véase Figura 40), esto casi en línea recta, posiblemente esto ocasiona que haya una acumulación en el pozo PR-4 (Véase Figuras 40). La línea de flujo sigue la dirección desde el pozo PR-1 hacia el pozo PR-4. Estos pozos están localizados en una zona permeable, lo que puede ser que el pozo PR-4 este influenciado por las infiltraciones provenientes del canal de agua AR-1 localizado a menos de 200 metros, el cual presenta una concentración de benceno de 44.45 ppm. La concentración del pozo PR-1 se puede atribuir a un caso de contaminación difusa, se supondría que sea causada por algunos ductos de distribución de combustible que puedan estar teniendo fugas.

Un punto importante es que la solubilidad del benceno en el agua es 1,750 mg/L, debido a esto, el arrastre por acción de la lluvia a partir de suelos contaminados por fuentes difusas constituye un importante riesgo de afectación en los distintos aprovechamientos hidráulicos y al agua subterráneas (Véase Tabla 8).

De acuerdo a la caracterización fisicoquímica y a los diagramas de dispersión obtenidos (Véase Anexo A), no se encontró una correlación directa entre los parámetros fisicoquímicos y el benceno. Se destaca que en los diagramas se muestran 3 grupos separados, de los cuales el primer grupo consta de concentraciones bajas (PR-3, PR-6, PR-7 y PR-8), el segundo grupo son los puntos intermedios (PR-4 y PR-5) y por último se muestra uno punto, el cual presenta la mayor concentración (PR-1). El segundo grupo correspondería a la zona en donde la concentración de benceno ya se está diluyendo al pasar por el medio geológico, estos aprovechamientos hidráulicos se ubican aguas abajo de la refinería (Véase Figura 68).

Sin embargo, aunque no existe una correlación directa con los análisis fisicoquímicos realizados, es evidente que los compuestos BTEX se pueden encontrar presentes en zonas cercanas a la refinería. Aunque las concentraciones reportadas en el agua pueden parecer bajas, es importante monitorear estos compuestos debido a su grado de toxicidad (Lottfinnasabasl *et. al.*, 2013; Fayemiwo *et. al.*, 2017).

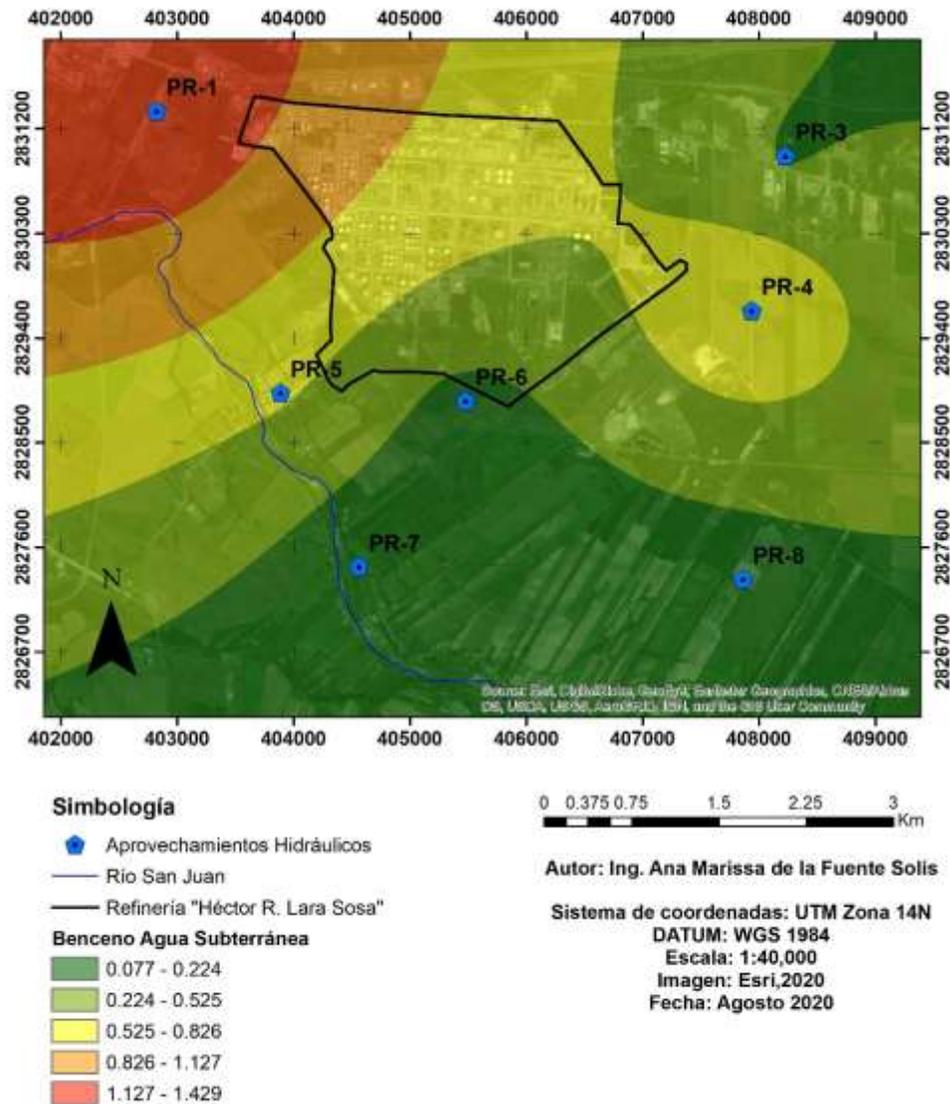


Figura 68. Mapas temáticos de la distribución del parámetro benceno en Agua subterránea.

5.3.4.2 Tolueno

El tolueno es muy volátil, escapa parcialmente a la atmósfera, a su vez es muy soluble en agua lo que ocasiona problemas de contaminación en cuerpos de agua superficial y subterránea (OMS, 2018). En la Figura 69, se presentan los resultados de Tolueno para agua subterránea de los aprovechamientos hidráulicos, PR-1, PR-3, PR-4, PR-5 y PR-6 corresponden a pozos de agua, PR-7 y PR-8 corresponden a norias.

Respecto a los resultados de la campaña de muestreo se obtuvo un valor promedio de 4.70 ppm, una mínima de 0.202 ppm y una máxima de 9.212 ppm. Tanto los pozos como las norias sobrepasan los LMP establecidos por la ADWG (0.025 ppm). Sin embargo, están por debajo de lo establecido por la Norma Mexicana Modificación-NOM-127-SSA1-1994 (0.7 ppm), la OMS (0.7 ppm) y la US EPA (1 ppm).

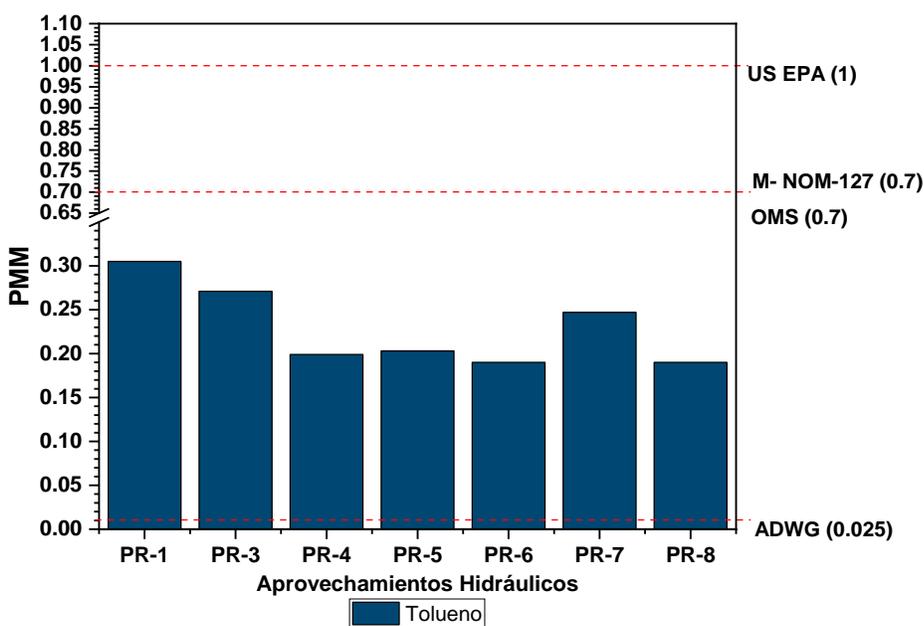


Figura 69. Concentración en ppm de tolueno.

En la Figura 70, se muestra la distribución de concentración del tolueno. Si bien el mayor porcentaje de concentración se encuentra en el pozo PR-1, ubicado al

Noroeste de la refinería, la contaminación del agua subterránea está distribuida en menor cantidad en los diferentes aprovechamientos hidráulicos. De igual manera que el benceno, la presencia de tolueno en el pozo PR-1 estaría asociada a un punto independiente de contaminación, se supondría que sea causada por contaminación difusa asociada a una fuga en un ducto o tubería cercana a este pozo.

De acuerdo a la caracterización fisicoquímica y a los diagramas de dispersión obtenidos (Véase Anexo B), al igual que el benceno no se encontró una correlación directa entre los parámetros fisicoquímicos y el tolueno. Sin embargo, sin importar las características fisicoquímicas las concentraciones de benceno y tolueno son independientes supondríamos que responden a la acumulación en los aprovechamientos hidráulicos derivado de posibles descargas no controladas.

En el caso del etilbenceno y xileno, el equipo de cromatografía identificó señales de estos compuestos, sin embargo, la intensidad de las señales era muy baja, aunado y considerando la sensibilidad del equipo se consideró que era más correcto no cuantificarlos y mencionar que están en niveles de trazas (concentraciones muy bajas).

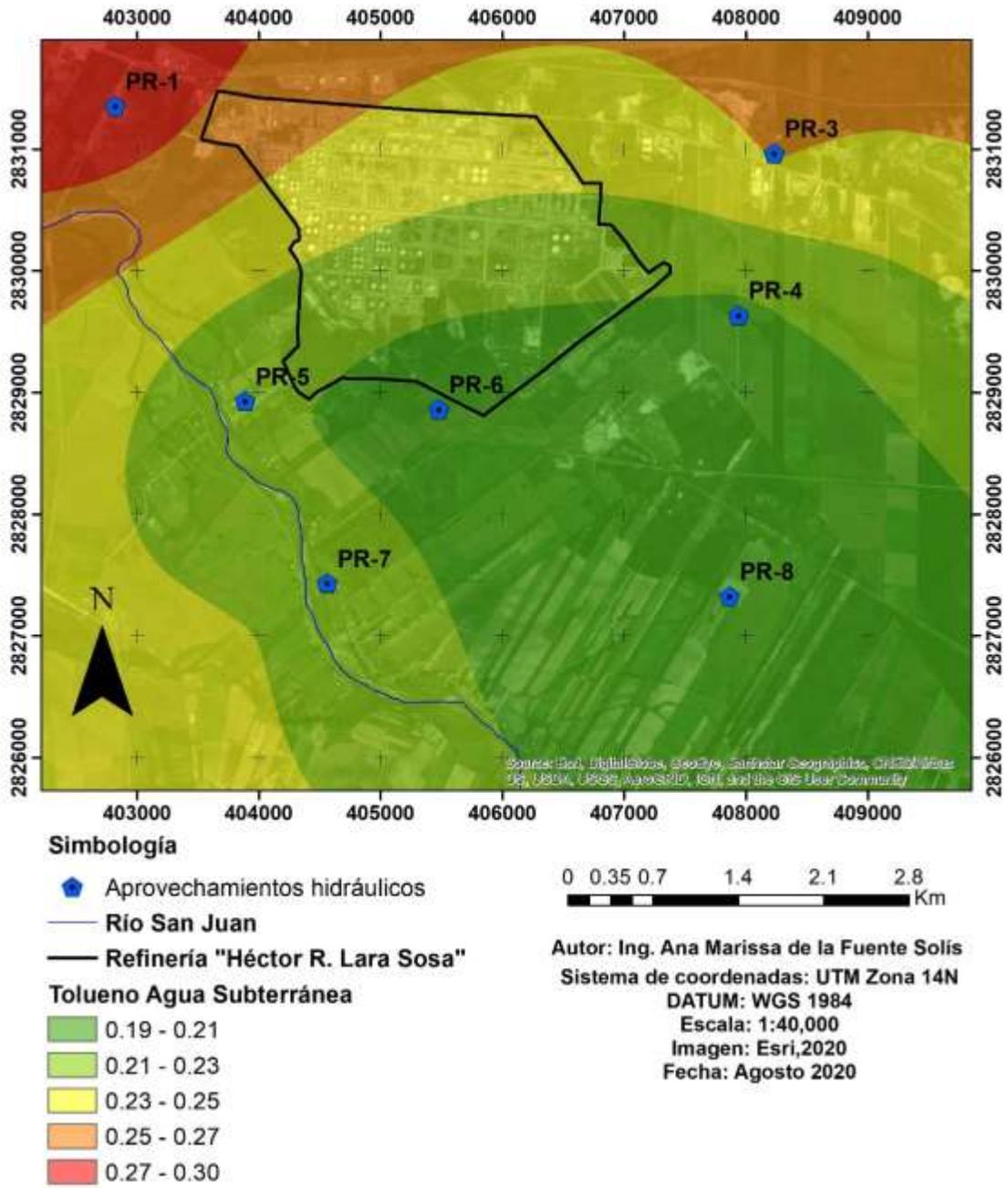


Figura 70. Mapas temáticos de la distribución del parámetro tolueno en agua subterránea.

5.4.3 Agua superficial

5.4.3.1 Benceno

En la Figura 71, se presentan los resultados de benceno para agua superficial, AR-1 y AR-2 corresponden a canales de agua, AC-1 y AC-2 corresponden a muestras tomadas en el cauce del río San Juan.

Respecto a los resultados de la campaña de muestreo se obtuvo un valor promedio de 30.796 ppm, una mínima de 0.229 ppm y una máxima de 77.654 ppm. Siendo los canales de agua cercanos a la refinería los que presentan concentraciones elevadas de benceno. Tanto los canales de agua como las muestras tomadas en el cauce del río, sobrepasan los LMP establecidos por la OMS (0.01 ppm), la Norma Mexicana Modificación-NOM-127-SSA1-1994 (0.01 ppm), la ADWG (0.001 ppm) y la US EPA (0.005).

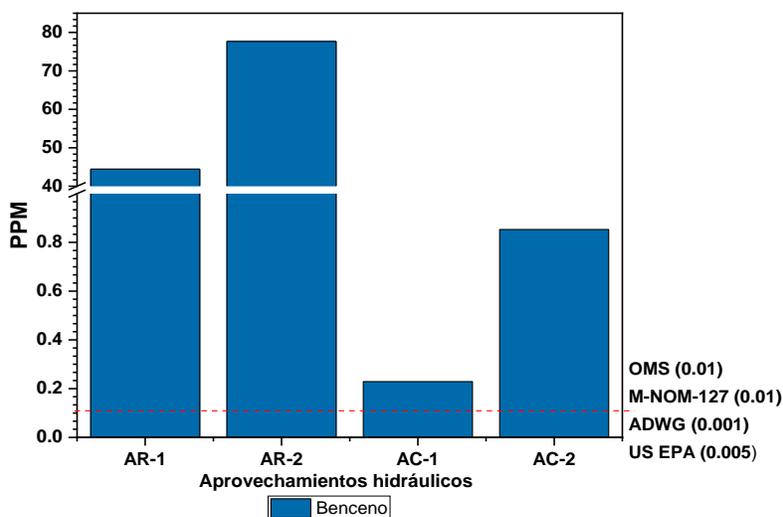


Figura 71. Concentración en ppm de benceno.

Respecto a la caracterización fisicoquímica y a los diagramas de dispersión obtenidos (Véase Anexo C), no se encontró una correlación directa entre los parámetros fisicoquímicos y el benceno. Solo los parámetros de NT, fosfatos y DQO mostraron cierta relación en su comportamiento. Sin embargo, en los diagramas se observan 3 grupos separados, de los cuales el primer grupo corresponden a los

puntos en el cauce del río AC-1 y AC-2 con concentraciones bajas, en el segundo grupo se ubica el canal de agua AR-1 con concentraciones por arriba del promedio y por último en el tercer grupo está el canal de agua AR-2 con la mayor concentración de tolueno. Aunado a esto, en campo se observó presencia de benceno en los canales de agua AR-1 y AR-2, ya que había un olor fuerte a gasolina tomando en cuenta que la densidad de benceno es menor a la del agua, y en un medio acuático, este permanece en la superficie de ésta.

De acuerdo a Roy (2011) y Fayemiwo *et. al.*, 2017, la principal fuente de contaminación por BTEX en el agua superficial y subterránea es por derrames de tanques de almacenamiento con fugas, derrames de gasolinas, tuberías con fugas y descargas industriales. De la misma manera en el área de estudio, la refinería “Héctor R. Lara Sosa” ha generado daños en el suelo y en el agua superficial por derrames en lagunas de almacenamiento y fugas en los ductos de las tuberías (El norte, 2020; Milenio, 2014; El Economista, 2014). Esto se confirma con los datos obtenidos en el muestreo, si bien la contaminación va disminuyendo a medida que nos alejamos de la refinería, se destaca la presencia de benceno en los canales de agua AR-1 y AR-2. Se supondría que la refinería estuviera teniendo descargas no controladas de manera superficial que afectarían los canales de agua por eso su alta concentración de benceno.

Por otra parte, Meniconi *et. al.*, (2002), caracterizaron la composición de los hidrocarburos y otros compuestos liberados al agua en diferentes regiones de Brasil como resultado de derrames de petróleo. Destacando que la concentración y persistencia de compuestos BTEX fue directamente proporcional a la escala y duración del derrame de hidrocarburos, destacando altas concentraciones de BTEX en derrames de petróleo a gran escala y de larga duración. A su vez, en el área de estudio, se muestra la distribución de la concentración de benceno (Véase Figura 72), en donde observamos que la contaminación está en una zona cercana a la refinería. Como se ha mencionado anteriormente los BTEX se pueden evaporar y disolver fácilmente en agua debido a que tienen un $K_{OW} < 4$, sin embargo, la contaminación está presente.

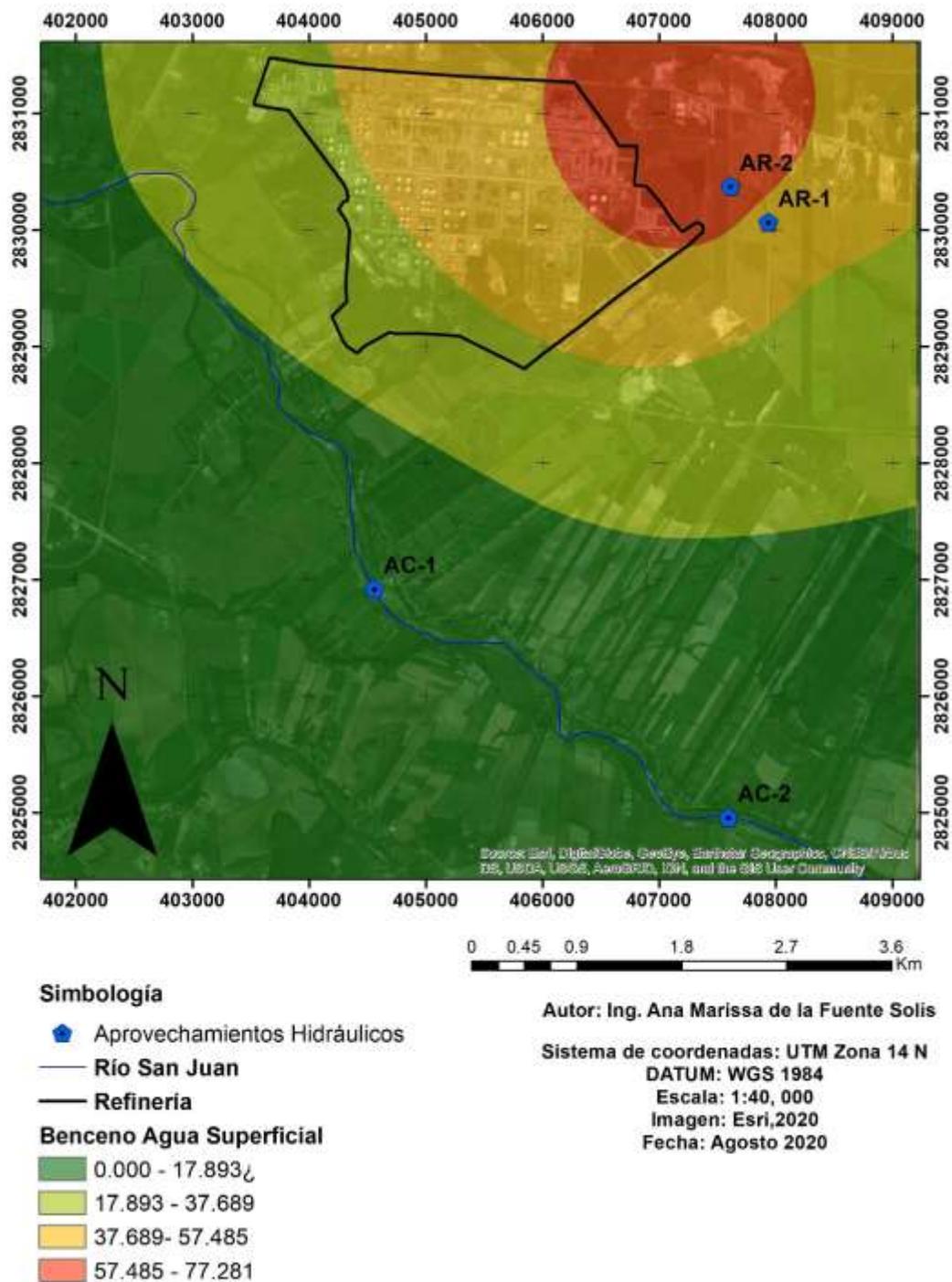


Figura 72. Mapas temáticos de la distribución del parámetro benceno en agua superficial.

5.4.3.2 Tolueno

En la Figura 73, se presentan los resultados de benceno para agua superficial, AR-1 y AR-2 corresponden a canales de agua, AC-1 y AC-2 corresponden a muestras tomadas en el cauce del río San Juan. Los resultados de la campaña de muestreo oscilaron entre 0.20 ppm a 9.21 ppm.

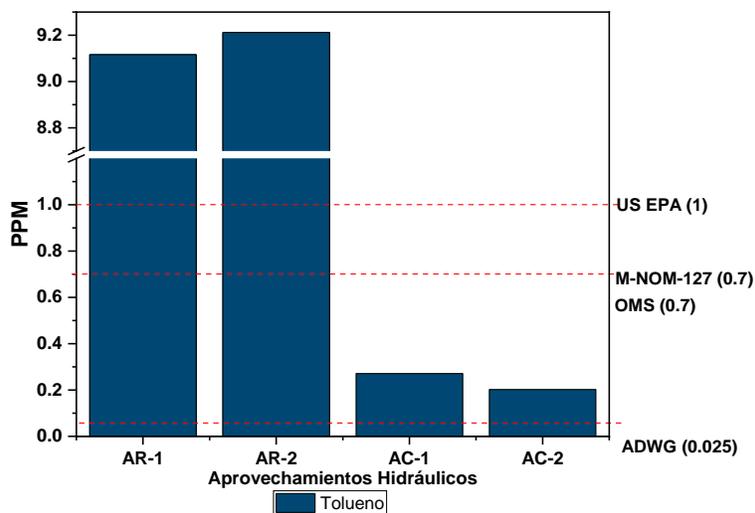


Figura 73. Concentración en ppm de Tolueno.

La mayor permisibilidad para el tolueno se atribuye a su fuerte olor, que a menudo lo hace fácilmente detectables (Leusch y Bartkow, 2010). En campo se identificó que los canales de agua AR-1 y AR-2 tenían un olor particular a gasolina, a su vez se identificó mediante el análisis de CG que los canales de agua sobrepasan los LMP establecidos por las distintas agencias regulatorias (Véase Tabla 9). Las muestras de agua tomadas en el cauce del río AC-1 y AC-2 sobrepasan los LMP establecidos por la ADWG (0.025 ppm), sin embargo, están por debajo de lo establecido por la Norma Mexicana Modificación- NOM-127-SSA1-1994, la OMS y la US EPA.

Es importante tener en cuenta que la volatilidad del tolueno y del benceno podría impedir su identificación en concentraciones superiores a unos pocos $\mu\text{g/L}$ en el agua superficial. Al igual que el benceno la mayor concentración de tolueno se

localiza al noreste de la refinería en los canales de agua AR-1 y AR-2 y se ve en menores concentraciones conforme nos alejamos de la refinería.

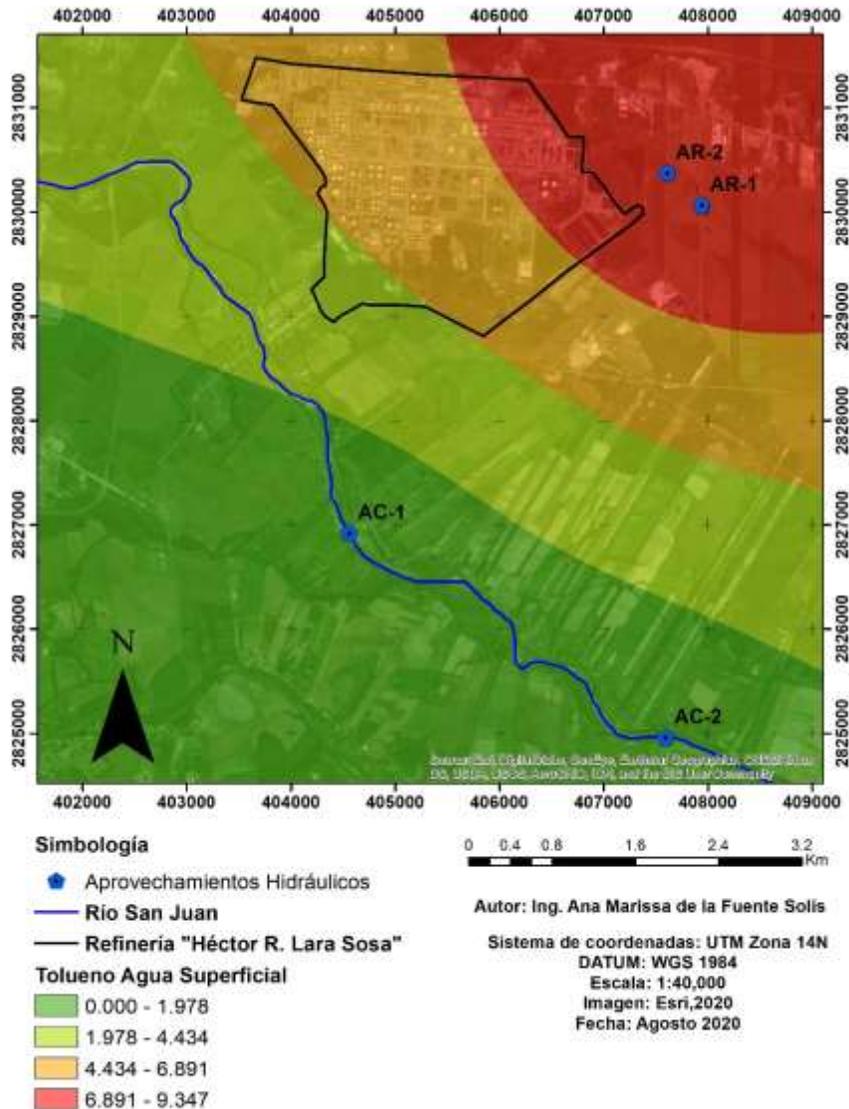


Figura 74. Mapas temáticos de la distribución del parámetro tolueno en agua superficial.

Es importante mencionar que la refinería "Héctor R. Lara Sosa", produce distintos tipos de gasolinas, asfalto, propileo y gas LP, entre otros petrolíferos. Aunado a esto uno de los componentes principales de la gasolina son los BTEX, por lo que estos compuestos están presentes en conjunto, en distintas concentraciones.

En el caso del etilbenceno se ha reportado que es detectado con poca frecuencia en el agua superficial usada como fuente de agua potable. Por su parte el Xileno es muy volátil y tiene una vida media de 29 a 144 horas en ríos (Montanez, Aleyda *et. al.*, 2009; U.S. EPA., 2013). Al igual que en la sección anterior el equipo de cromatografía identifico señales de estos compuestos, sin embargo, se consideró que era más correcto no cuantificarlos y mencionar que están en niveles de trazas.

5.4 Sitios contaminados visualmente identificados en campo

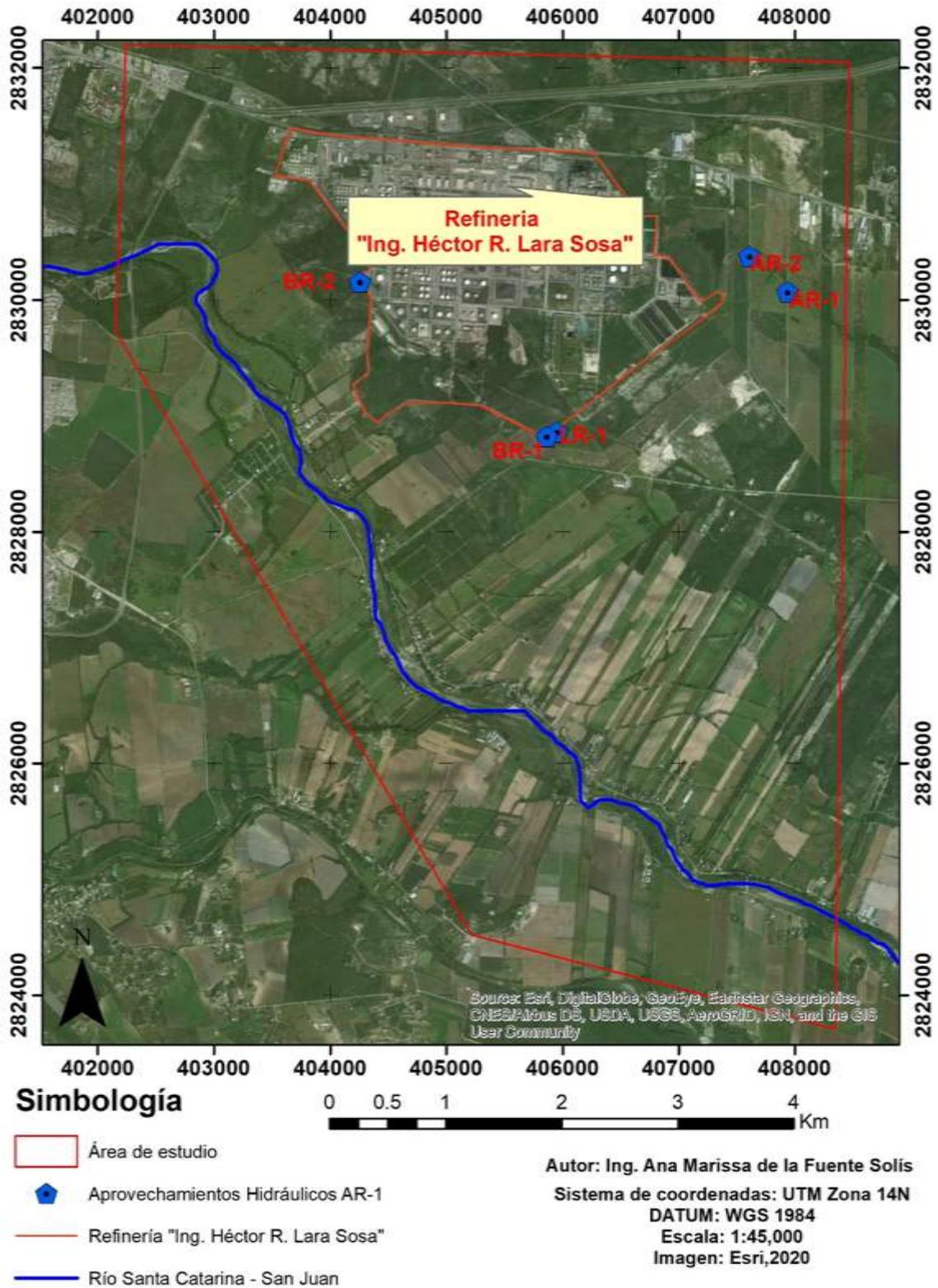


Figura 75. Puntos de contaminación visual localizados en la zona de estudio.

En la Figura 75, se muestran los diferentes sitios que se detectaron los cuales presentan contaminación visualmente.

A continuación, se describen cada uno de los sitios identificados en la Figura 75.

Sitio: AR-1 “Arroyo-Vaquitas” (Véase Figura 76).



Figura 76 . AR-1 “Arroyo-Vaquitas”, Coordenadas:14R 407939m E,2830064m N.

Observaciones: Canal de agua ubicado aproximadamente a 550 metros de la refinería, se observó tontalidades negras en algunos puntos del canal y un olor a gasolina. Los resultados en laboratorio correspondientes a este punto indicaron precencia de Benceno y Tolueno con valores de 44.45 ppm y 9.11 ppm respectivamente.

Sitio: AR-2 “Arroyo-COV” (Véase Figura 77).



Figura 77. AR-2 “Arroyo-COV”, Coordenadas:14 R 407611 m E, 2830372 m N.

Observaciones: Canal de agua ubicado aproximadamente a 250 metros de la refinería, se observó mucha espuma en el agua, un fuerte olor a gasolina y en muestras de roca se observó el color negro característico de los hidrocarburos. Los resultados en laboratorio correspondientes a este punto indicaron la mayor presencia de Benceno y Tolueno con valores de 77.65 ppm y 9.21 ppm respectivamente.

Sitio: BR-1 “Barda Refinería” (Véase Figura 78).



Figura 78. BR-1 “Barda Refinería”, Coordenadas: 14 R 405863 m E, 2828817 m N.

Observaciones: Punto de posible descargas de la refinería, se observó diferentes tonalidades en las plantas y troncos de los árboles.

Sitio: BR-2 “Árboles negros” (Véase Figura 79).



Figura 79. BR-2 “Árboles negros”, Coordenadas: 14R 404256 m E, 2830151 m N.

Observaciones: Punto de posible descargas de la refinería, se observó diferentes tonalidades en los troncos de los árboles, destacando las tonalidades negras impregnadas en los troncos.

Sitio: LR-1 “Lonas” (Véase Figura 80).



Figura 80. LR-1 “Lonas”, Coordenadas: 14R 405953 m E, 2828857 m N.

Observaciones: Punto ubicado a menos de 50 metros de la barda de la refinería. Se desconoce el material de las geomembranas, se observó la descomposición del material, esto genera lixiviados que contamina aguas subterráneas, aguas superficiales y suelos.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- En el área de estudio afloran sedimentos cuaternarios (Sedimentos aluviales SA, terrazas 1, 2 y 3 y sedimentos finos SF), que representan el acuífero de poros y sedimentos consolidados de lutitas pertenecientes a la formación Méndez, que representan el acuífero de grietas. Ellas se encuentran altamente fracturadas e intemperizadas; además se identificaron dos sistemas de fracturamiento “ac” y “bc”, todos ellos documentados en la carta geológica obtenida.
- Con la aplicación del uso de drones (Uso de MDE) y el análisis de imágenes satelitales, en conjunto con los MDE de INEGI (validación con drones), se determinó que son una herramienta muy útil para identificar las diferentes terrazas que afloran a lo largo del cauce del río San Juan. Con el uso de drones se pudo verificar la existencia de los sedimentos cuaternarios y sedimentos consolidados (ortomosaicos y MDE).
- Las cartas piezométricas obtenidas indican que el flujo del agua subterránea en el área de estudio es del noroeste al sureste por lo que sigue el flujo en dirección al río San Juan, para después proseguir su trayectoria hacia la presa el Cuchillo, fuente principal de abastecimiento de agua superficial del Área Metropolitana de Monterrey. Los niveles estáticos varían entre 3 a 27 metros. Los valores de gradiente hidráulico (i) variaron muy poco, para el mes de octubre del 2019 el valor promedio fue de 0.00448 (4.48%), para el mes de noviembre del 2019 0.00404 (4.04%), mientras que para el mes de agosto del 2020 el valor medio fue 0.00442 (4.42%), clasificándolo como un acuífero muy estable y dinámico. El flujo del agua subterránea se mueve paralelo a los dos sistemas de fracturamiento y a la vez también los contaminantes provenientes de la refinería en estudio.
- Los resultados obtenidos en las dos campañas de muestreo correspondientes a los parámetros fisicoquímicos (pH, Conductividad y SDT) indicaron que el agua (superficial y subterránea) en el área de estudio es agua salobre. A su vez, los resultados de Alcalinidad total como CaCO_3

indicaron que la dureza del agua está por encima de los límites máximos permisibles para consumo humano de acuerdo con lo establecido por la OMS y el Real Decreto para agua potable. Sin embargo, los resultados obtenidos de pH (~7), STV (< 350) en todos los puntos de estudios, no presentan evidencia de procesos biogeoquímicos asociados a la presencia de los aromáticos.

- Los resultados de los análisis químicos para la identificación de BTEX en la zona de estudio, indicaron que el benceno y el tolueno están presentes principalmente en el agua superficial donde se cuantificaron niveles de benceno (entre 40 - 80 ppm) y tolueno (10 ppm) para los puntos AR-1 y AR-2. Para el resto de puntos ambas moléculas no sobrepasaron 1 ppm. En lo que corresponde al estudio del agua subterránea en todos los casos los valores siempre fueron < 1.4 ppm para benceno y <0.3 ppm para tolueno. De acuerdo con lo establecido por las diferentes agencias regulatorias, el tolueno supera los LMP establecidos por la ADWG, sin embargo, estos están por debajo de los LMP de la OMS, la US EPA y la norma mexicana Modificación-NOM-127-SSA1-1994.
- En la mayor parte de las muestras superficiales (canales) y subterráneas (pozos) se identificó la presencia de etilbenceno y xileno a nivel de trazas.
- La refinería “Héctor R. Lara Sosa”, es una fuente potencial de contaminación, afectando la calidad del aire, suelo y del agua, perjudicando la calidad de vida de los habitantes de los ejidos aledaños. Dada la alta volatilidad de estas sustancias principalmente benceno a 25°C y presión atmosférica, su presencia se puede asociar a fallas en sus instalaciones, como el desborde de residuos de agua y lodo con hidrocarburos (lago de desechos), además de fugas en sus tuberías, incluidas las tomas clandestinas.
- En el área de estudios existe contaminación, sin embargo, para implementar métodos de remediación y/o saneamiento es necesario realizar una evaluación más rigurosa en el área, así como también tomar en cuenta otros parámetros y criterios. Algunos métodos para el tratamiento de BTEX pueden ser mecánicos tales como utilizar bombas de extracción o barreras, otro

método son los biológicos, que incluyen la biorremediación, bioventilación o biodegradación y por último los métodos fisicoquímicos tales como adsorbentes y redacciones REDOX.

6.2 Recomendaciones

- El agua subterránea es una de las principales fuentes de abastecimiento para los seres humanos, por lo que es esencial el monitoreo continuo de los diferentes aprovechamientos hidráulicos para evaluar el grado de contaminación, ya que actualmente no existe una normativa específica para determinar los LMP de sus contaminantes. Se recomienda que se implemente una norma específica para regular los diferentes contaminantes derivados del petróleo en el agua subterránea.
- Se recomienda realizar campañas periódicas de muestreo, tanto para agua superficial como subterránea, para ver la evolución de los compuestos BTEX. Así como también se recomienda buscar, identificar y realizar muestreos en más aprovechamientos hidráulicos.
- Realizar muestreos de suelo y de agua subterránea a diferentes profundidades del acuífero.
- Se recomienda implementar el uso de trazadores de manera controlada en campo para obtener la movilidad y comportamiento de los contaminantes en el acuífero. Para poder corroborar que las concentraciones disminuyen conforme a la dirección del flujo del agua subterránea.
- Es importante que se evalúen otros parámetros fisicoquímicos, tales como oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, iones mayoritarios y menores. Así como también análisis de laboratorio de los compuestos de hidrocarburos más peligrosos, medición de parámetros in situ, análisis de otros indicadores inorgánicos y combinarlos con análisis bacteriológicos.
- En el marco normativo, se recomienda que la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (Modificación año 2000), sea revisada ya que esta no engloba los elementos químicos de riesgo a la salud derivados de la ingestión de agua con hidrocarburos.

- Realizar estudios de suelo a diferentes profundidades para determinar si existe contaminación de BTEX y hacer una comparativa con la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y sus lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.

Bibliografía

1. A. Demoulin, B. Bovy, G. Rixhon, Y. Cornet, (2007). An automated method to extract fluvial terraces from digital elevation models: The Vesdre valley, a case study in eastern Belgium, *Geomorphology*, Volume 91, Issues 1–2, Pages 51-64, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.01.020>.
2. Agencia para Substancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (ATSDR), (1999). División de toxicología ToxFAQs™ Etilbenceno. España, p. 12.
3. Anejionu, O. C., Ahiaramunnah, P. A. N., & Nri-ezedi, C. J., (2015). Hydrocarbon pollution in the Niger Delta: Geographies of impacts and appraisal of lapses in extant legal framework. *Resources Policy*, 45, 65-77.
4. Animas, G. Y. A., Tortolero, C. L. A., (2017). *Fundamentos de Química Orgánica y Aplicaciones en Ciencias de la Tierra*, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
5. APHA, (1995). *Standard Methods for the Examination for Water and Wastewater*. USA: American Public Health Association, Washington, DC 20005, 19th Edition.
6. APHA-AWWA-WPCF, (1989). *Métodos de Normalización para análisis de aguas potables y residuales*. Ediciones Díaz de Santos, S.A.
7. Appelo, C y Postma, D., (1993). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Balkema, 536 pp.
8. Aranda, D. F. C., (1987). *Procesos del ciclo hidrológico*. UASLP.
9. Arias, J. A. V., (2017). Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *RIAA*, 8(1), 151-167.
10. Avila, J. P., Canul, R. P., & Sansores, A. C., (2002). Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. *Ingeniería*, 6(3), 73-81.

11. Ayala Cruz, M. D. L. A., (1996). Calidad fisicoquímica y bacteriológica de un acuífero de Cadereyta Jiménez, Nuevo León (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
12. Bolaños-Alfaro, J. D., Cordero-Castro, G., & Segura-Araya, G., (2017). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). *Revista Tecnología en Marcha*, 30(4), 15-27.
13. Brito, E. M., De la Cruz Barrón, M., Caretta, C. A., Goñi-Urriza, M., Andrade, L. H., Cuevas-Rodríguez, G., & Guyoneaud, R., (2015). Impact of hydrocarbons, PCBs and heavy metals on bacterial communities in Lerma River, Salamanca, Mexico: Investigation of hydrocarbon degradation potential. *Science of the Total Environment*, 521, 1-10.
14. Catalán J., (1969), *Química del Agua*. Editorial Blumer, España.
15. Centro virtual de de Información del agua, 2017. Véase: Agua.org.mx.
16. Chebotarev, I., (1955). Metamorphismo of natural waters in the crust of weathering... *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 8, Part 1 22–48; Part II 137–170.
17. Chereque M. Wendor, (1989), *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*, Pontificia Universidad Católica del Perú, obra auspiciada por CONCYTEC, Lima, Perú.
18. Claros Zelaya, R. A., Guevara Aguilar, A. E., Cruz, P., & Ricardo, N., (2016). Aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (Doctoral dissertation, Universidad de El Salvador).
19. 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.
20. Comisión Nacional del Agua, (2015). <https://www.gob.mx/conagua>.
21. CONAGUA, (2009). Estudios para la determinación de la Disponibilidad de Aguas Subterráneas.

22. CONAGUA, (2017). Estadísticas del Agua en México. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
23. Cordova Estrada A.K., Lara Díaz R. A. y Cordova Lozano F., (2019). BTEX en agua: avances y perspectivas para su tratamiento. Entorno UDLAP, 9.
24. Cruz-López, A., Dávila-Pórcel, R. A., de León-Gómez, H., Rodríguez-Martínez, J. M., Suárez-Vázquez, S. I., Cardona-Benavides, A., ... & del Socorro Espino-Valdes, M. (2020). Exploratory study on the presence of bisphenol A and bis (2-ethylhexyl) phthalate in the Santa Catarina River in Monterrey, NL, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(8), 1-13.
25. Cuevas, J. R. L., & Naranjo, D. L., (2018). Los efectos de la contaminación petrolera en el desarrollo de comunidades ejidales: El caso de la cuenca del río San Juan (Nuevo León, México) *Investigación & Desarrollo*, 26(1), 92-124.
26. Custodio E., & Llamas M.R., (1996). Hidrología subterránea. Segunda edición. Omega. Tomo I. Barcelona.
27. 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.
28. Delgado, C. D., Alberich, M. V. E., & López-Vera, F. (Eds.), (2005). Recursos hídricos: conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica. Piriguazú Ediciones.
29. Diario Oficial de la Federación, (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Citrícola Norte (1912), Estado de Nuevo León. doi:10.4314/wsa.v43i4.08
30. Dongman, S. L., (1994). *Physical Hydrology*. Editorial Prentice-Hall; Estados Unidos de América.
31. 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.

32. El economista, (2014). Fuente: <https://www.eleconomista.com.mx/politica/Derrame-de-petroleo-contaminacion-en-NL-20140821-0066.html>
33. El norte, (2020). Fuente: https://www.elnorte.com/aplicacioneslibre/preacceso/articulo/default.aspx?_rval=1&urlredirect=https://www.elnorte.com/agravan-con-parche-derrame-de-refineria/ar2017091?referer=--7d616165662f3a3a6262623b727a7a7279703b767a783a--
34. Escobar, C. N., (2003), Análisis de compuestos orgánicos volátiles en agua potable por cromatografía de gases., Universidad de los Andes, Bogota, D.C.
35. Expansion, (2014). Fuente: <https://expansion.mx/negocios/2014/08/25/derrame-en-nl-fue-de-4000-barriles>
36. Fayemiwo, O. M., Daramola, M. O., & Moothi, K., (2017). BTEX compounds in water-future trends and directions for water treatment. *Water Sa*, 43(4), 602-613.
37. Ferreira, M. R., & Aira, V. G., (2017). Aplicaciones Topográficas de los Drones. Obtenido de: <http://www.bibliotecapca.org.ar/greenstone/collect/otragr/index/assoc/HASH0159/314a3cb>, 8, 11.
38. Fetter CW., (2001) *Applied Hydrogeology*, Fourth Edition edn Prentice Hall, Upper Saddle New Jersey
39. Flores-Laureano, J. S., (1997): Evaluación de la calidad de agua del Río San Juan en el Estado de Nuevo León. (Tesis de Maestría). FCF/UANL, Linares, Nuevo León, México
40. Fuentes Rivas, R. M., Ramos Leal, J. A., Jiménez Moleón, M. D. C., & Esparza Soto, M., (2015). Caracterización de la materia orgánica disuelta en agua subterránea del Valle de Toluca mediante espectrofotometría de fluorescencia 3D. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 31(3), 253-264.

41. 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.
 42. García, J. E. A., & FLÓREZ, L. M. V., (2011). Estandarización de la técnica de cromatografía de gases con detector de ionización por llama para la determinación de BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) en matrices acuosas (Doctoral dissertation, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Química Industrial).
 43. García, V. L. A., & Fernández, V. G., (2014). Health risk assessment of zone 7 contaminated with benzene in the environmental liability generated by the "March 18th Ex-Refinery" in Mexico City. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 15(3), 419-428.
 44. Garza Garza, C. M. D. L., (1998). El agua y la sociedad: abastecimiento y contaminación del agua en el área metropolitana de Monterrey, NL (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
 45. Gobierno del Estado (GOB), (2019), Información Estadística Climatológica, Estación Meteorológica, Cadereyta (19008).
 46. Goss MJ, Barry DAJ and Rudolph DL., (1998). Contamination in Ontario farmstead domestic wells and its association with agriculture: Results from drinking water wells. *J. Contam. Hydrol.* 32 (3)267–293.
 47. Guo, Wei, et. al., (2011). "Aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in the Xihe River, an urban river in China's Shenyang City: distribution and risk assessment." *Journal of hazardous materials* 186.2-3: 1193-1199.
 48. Hunt J. M., 1996. *Petroleum Geochemistry and Geology, Second Edition*: San Francisco, Freeman and Company. 743 p.
 49. Ibarra Martínez, S. E., (2007). Riesgos Geológicos de la Región Sursureste del Área Metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México (Mederos). (Tesis de Maestría). FCT/UANL, Linares, Nuevo León, México.
- in water-future trends and directions for water. *Water SA*, 43(4), 602-613.

50. INEGI, (1986). Síntesis Geográfica del Estado de Nuevo León. S.P.P. México D.F.
51. INEGI, (1990). Geología de la República Mexicana.
52. INEGI, (2005). Guía para la Interpretación de Cartografía Climatológica.
53. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)., (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Cadereyta Jiménez, Nuevo León. 19009.
54. Iriondo, M., (2007). Introducción a la Geología. Editorial Brujas.
55. Karlapudi, A. P., Venkateswarulu, T. C., Tammineedi, J., Kanumuri, L., Ravuru, B. K., ramu Dirisala, V., & Kodali, V. P. (2018). Role of biosurfactants in bioremediation of oil pollution-a review. *Petroleum*, 4(3), 241-249.
56. Lacasaña Navarro, M., González Alzaga, B., Rodríguez Barranco, M., Daponte Codina, A., (2008). Evaluación de la exposición a BTEX en la población del Campo de Gibraltar, Área de Consultoría Granada, Escuela Andaluza de Salud Pública.
57. Li, H.; Chen, L.; Wang, Z.; Yu, Z., (2019). Mapping of River Terraces with Low-Cost UAS Based Structure-from-Motion Photogrammetry in a Complex Terrain Setting. *Remote Sens.* 11, 464.
58. López Herrera, D., (2017). “Análisis y evaluación del impacto ambiental de las gasolinas que se comercializan en la CDMX respecto al contenido de BTEX”. (Tesis Licenciatura). Facultad de Química/UNAM, Ciudad Universitaria, CD. MX.
59. Lottfinnasabasl S, Gunale VR and rajurkar NS (2013). Petroleum hydrocarbons pollution in soil and its bioaccumulation in mangrove species, *Avicennia marina* from Alibaug mangrove ecosystem, Maharashtra, India. *Int. J. Adv. Res. Sci. Technol.* 2 (2)1–7.
60. Lozada, P. T., Vélez, C. H. C., & Patino, P., (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. *Revista de Ingenierías: Universidad de Medellín*, 8(15), 3.

61. Martínez Solís, A. M., (2016). Impacto de la sequía en el acuífero del centro de producción agropecuaria (CPA)/UANL, Linares, NL (Doctoral dissertation, UANL).
62. 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.
63. Mejía, W. H. D., Linares, B. G., & Coronel, N. C., (2007). Determinación del Coagulante que permita la máxima remoción de Fosfatos en Agua Cruda del Rio Otún. *Scientia et technica*, 1(34).
64. Metalf & Eddy., (1995). Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización. Volumen 1. McGraW-Hill.
65. Meyer, A. M., Klein, C., Fünfroeken, E., Kautenburger, R., & Beck, H. P., (2019). Real-time monitoring of water quality to identify pollution pathways in small and middle scale rivers. *Science of The Total Environment*, 651, 2323-2333.
66. Milenio., (2014). Fuente: <https://www.milenio.com/estados/dano-ecologico-en-nl-por-derrame-de-petroleo>
67. Miller, J.R., y Orbock-Miller, S.M., (1 Ed.), (2007). *Contaminated Rivers*: Springer. USA. 418 pp.
68. Mitra S and Roy P., (2011). BTEX: A serious ground-water contaminant. *Res. J. Environ. Sci.* 5 (5) 394–398.
69. 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.
70. Morales, C. M. T., (2017). Alcanos, Alquenos y Alquinos: Nomenclatura y Propiedades (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO).

71. Nava, Á. Á., (2002). "Impacto regional de la refinería Miguel Hidalgo en Tula de Allende, Hidalgo" (Tesis de Maestría), Instituto Politécnico Nacional, México, D.F.
72. Navarro, B. A., Forcada, E. G., Valsero, J. J. D., & López, J. M. N., (2018). Agua subterránea, medio ambiente, salud y patrimonio. Salamanca, 12(15).
73. Navarro, de León, (1996): "Estudio Hidrogeológico de la Loma Los Pozos durante la fase inicial del llenado de la Presa El Cuichillo Solidaridad, China, Nuevo León, México. (Tesis de Maestría). FCT/UANL, Nuevo León, México.
74. Norma Mexicana NMX-AA-029-SCFI-2001, Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 17 de Abril del 2001
75. Norma mexicana NMX-AA-030/2-SCFI-2011, Análisis de agua - Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba - parte 2 - determinación del índice de la demanda química de oxígeno – Método de tubo sellado a pequeña escala, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 27 de junio de 2013.
76. Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015, Análisis de agua - Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de marzo de 2016.
77. Norma Mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001, Análisis de agua - Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1 de agosto de 2001.
78. Núñez Mejía, J., (2019). Aplicación del método de diferencias finitas para el flujo de un contaminante en un acuífero confinado homogéneo e isotrópico.
79. Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). Guías para la calidad del agua potable.
80. Organización Mundial de la Salud (OMS). (2018). Guías para la calidad del agua potable (4ª ed.).

81. Padilla y Sánchez, R.J., (1985), Las estructuras de la Curvatura de Monterrey, Monterrey, estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí: Revista del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 6, 1–20.
82. Pérez, G. & Ramírez J.J., (2008). Fundamentos de limnología neotropical. 2ª edición. Editorial Universidad de Antioquia. 403pp.
83. Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población 2030 Cadereyta Jiménez (PDUUCP), Nuevo León, (2015).
84. Ramírez-Gallegos, D. G., (2017). “Caracterización Hidrogeoquímica de metales pesados en el Río Santa Catarina/Monterrey, Nuevo León” (Tesis de Maestría). FI/UASLP, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México
85. Rodríguez Calvo, A., (2017). Biorremediación de aguas contaminadas con hidrocarburos mediante sistemas bio-absorbentes.
86. Rosell-Melé, A., Moraleda-Cibrián, N., Cartró-Sabaté, M., Colomer-Ventura, F., Mayor, P., & Orta-Martínez, M., (2018). Oil pollution in soils and sediments from the Northern Peruvian Amazon. *Science of The Total Environment*, 610, 1010-1019.
87. Ruales Salazar, D. N. (2018). Pertinencia del uso de Drones en la caracterización geo espacial del módulo dos juntas de agua de riego de la comuna Morlán, Imbabura (Tesis de Maestría). Ecuador.
88. Saval, S., Lara, F., Lesser, J. M., & Nieto, J. M., (2004). Contaminación de acuíferos con hidrocarburos: Causas, efectos, riesgos asociados y medidas de prevención. *El agua en México vista desde la Academia*. Academia Mexicana de Ciencias. México, DF ISBN, 968-7428.
89. Sawyer N. C., McCarty L. P., Parkin F. G., (2000). *Química para ingenieros ambientales*. Colombia: Emma Aritza H.
90. Schwarzenbach, G., and Meier, J., (1958). Formation and investigation of unstable protonation and deprotonation products of complexes in aqueous solution. *J. Inorg. Nuclear Chem.* 8, 302–312.
91. SEMARNAP, I. (1997). Estadísticas del medio ambiente.

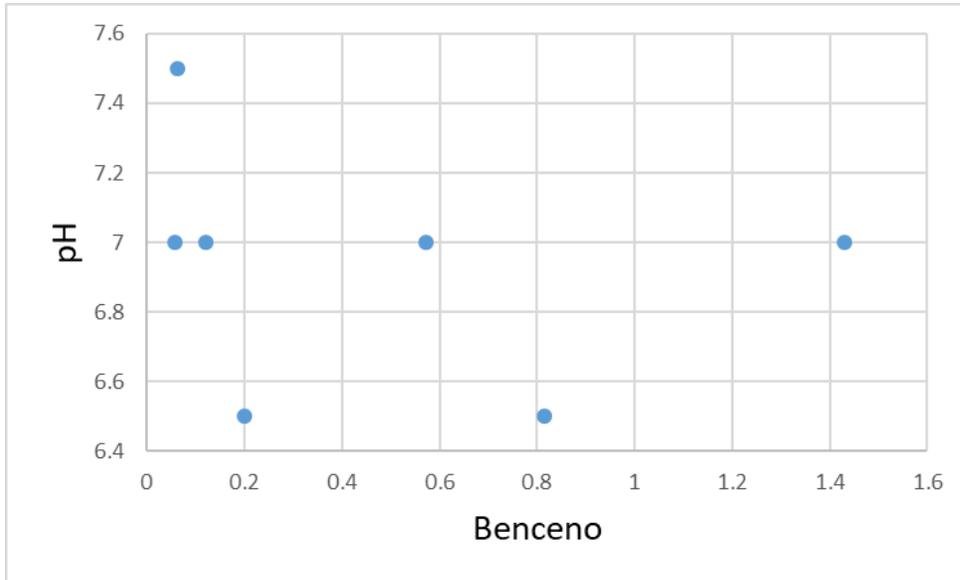
92. SEMARNAT. (2016). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. SEMARNAT.
93. Serrano, A., Gallego, M., & Silva, M. (2007). Enhancing Sensitivity in Headspace-Mass Spectrometric Determination of BTEX in Drinking Water. *Analytical Chemistry*, 79(7), 2997–3002.
94. Sun, P., Elgowainy, A., Wang, M., Han, J., & Henderson, R. J., (2018). Estimation of US refinery water consumption and allocation to refinery products. *Fuel*, 221, 542-557.
95. Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., Tasa, D., & Cientificas, A. T., (2005). *Ciencias de la Tierra*. Madrid: Pearson Educación.
96. U.S. EPA., (2013). Mn and Btex Reference Value Arrays (Final Reports). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-12/047F.
97. Werner, J., (1996). *Introducción a la Hidrogeología*. Primera edición, Linares, Nuevo León, México. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra.
98. WWAP, T., (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás.
99. 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.
100. Zenteno D.J., (1984). *Geología de la República Mexicana*. Universidad Nacional Autónoma de México.
101. Zhang, Z., Wang, J. J., Tang, C., & DeLaune, R. D., (2015). Heavy metals and metalloids content and enrichment in Gulf Coast sediments in the vicinity of an oil refinery. *Journal of Geochemical Exploration*, 159, 93-100.

ANEXOS

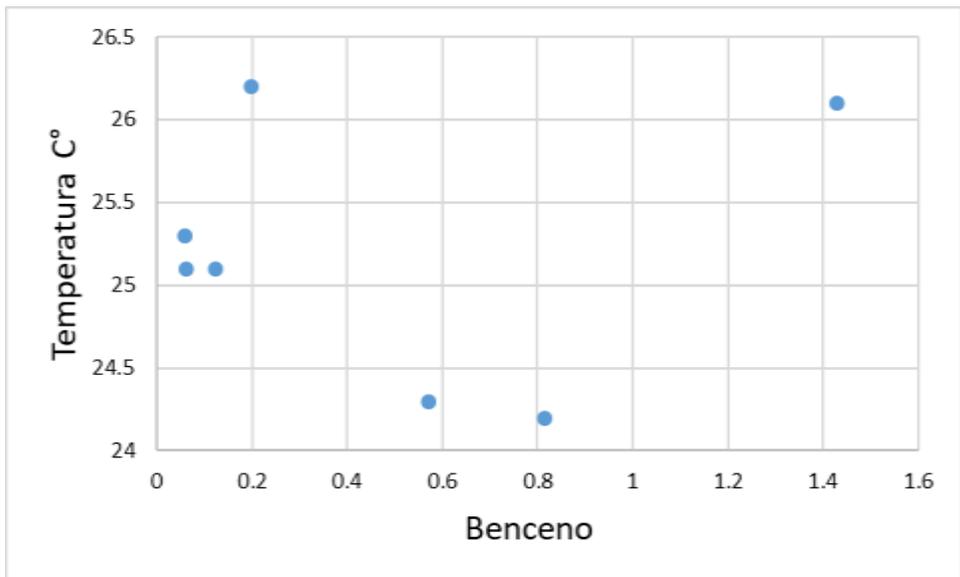
Anexo A

Parámetros Físicoquímicos vs Benceno correspondientes a Agua Subterránea

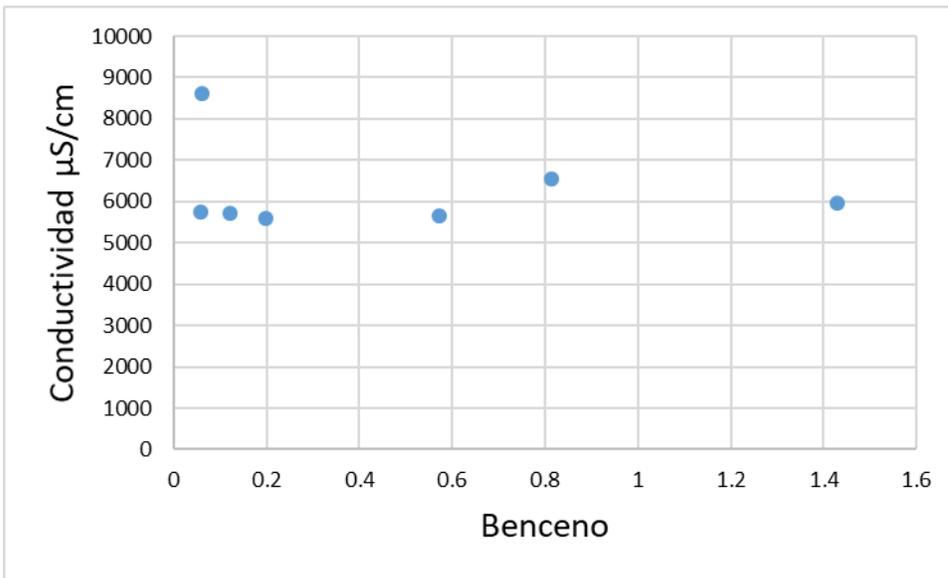
- pH vs Benceno



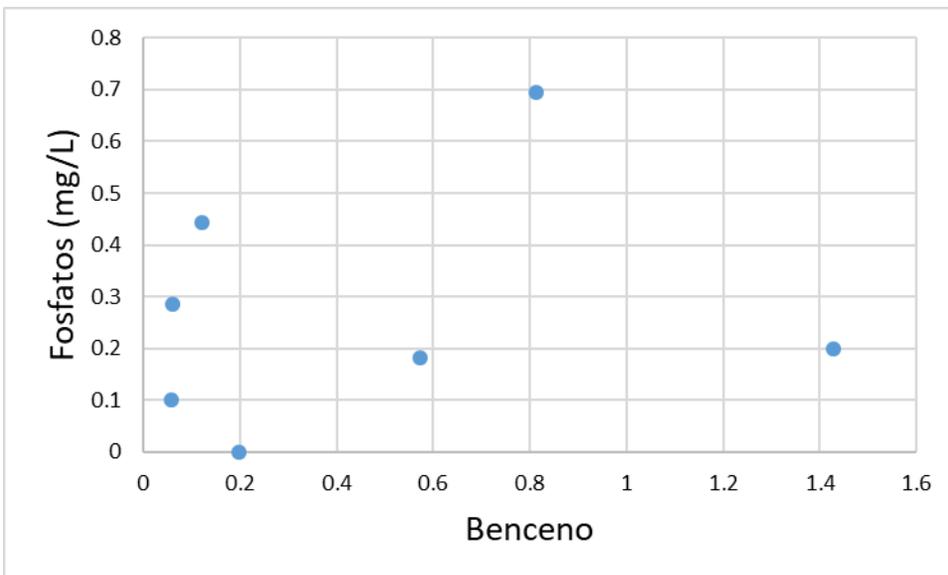
- Temperatura vs Benceno



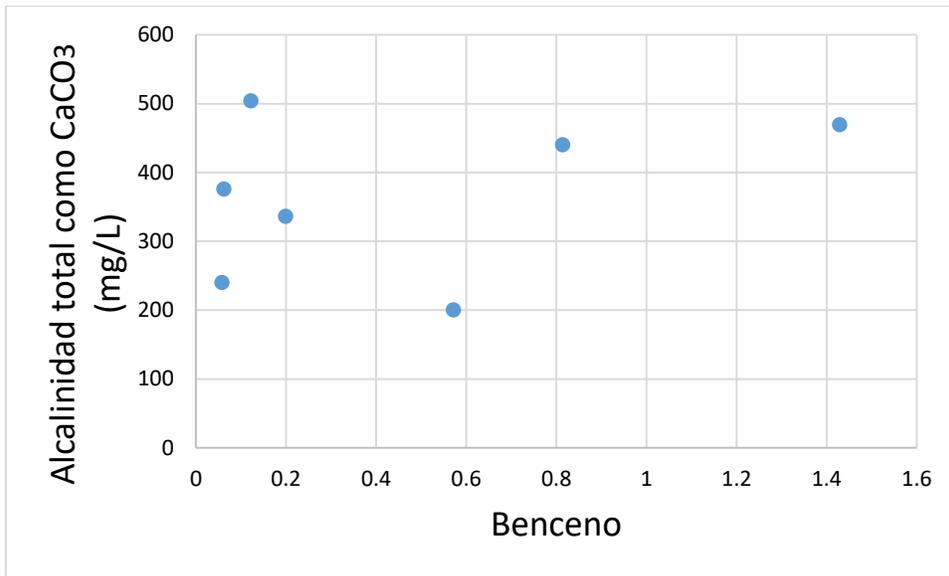
- Conductividad vs Benceno



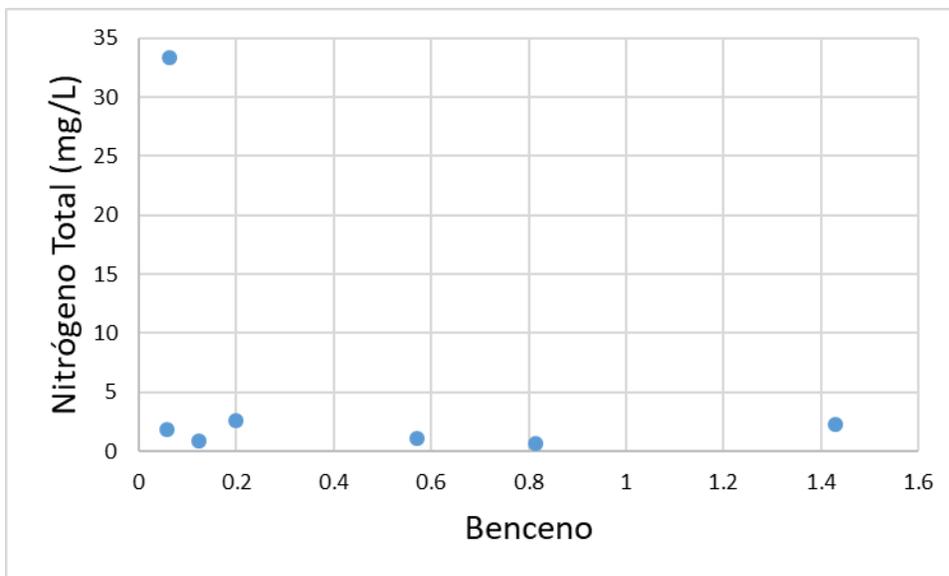
- Fosfatos vs Benceno



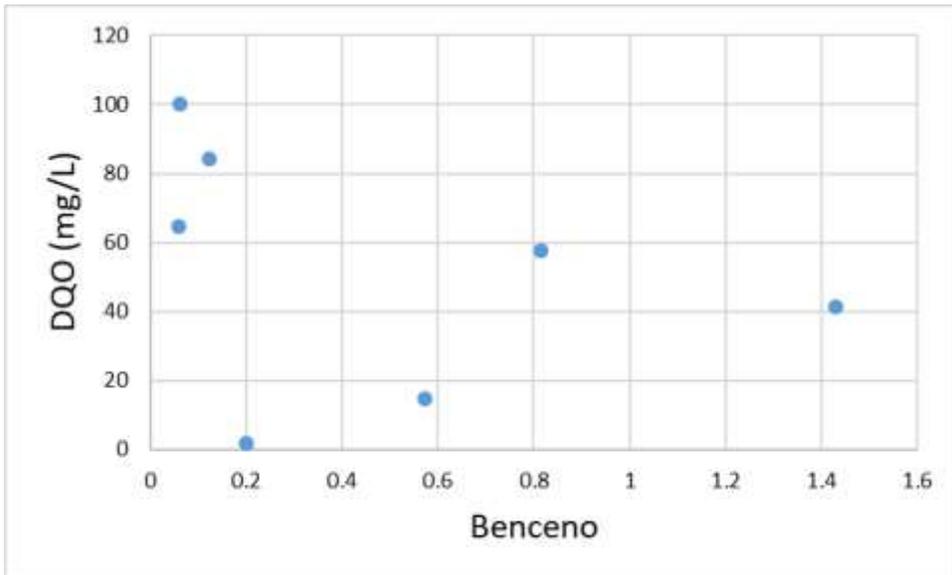
- Alcalinidad como CaCO_3 vs Benceno



- Nitrógeno Total vs Benceno



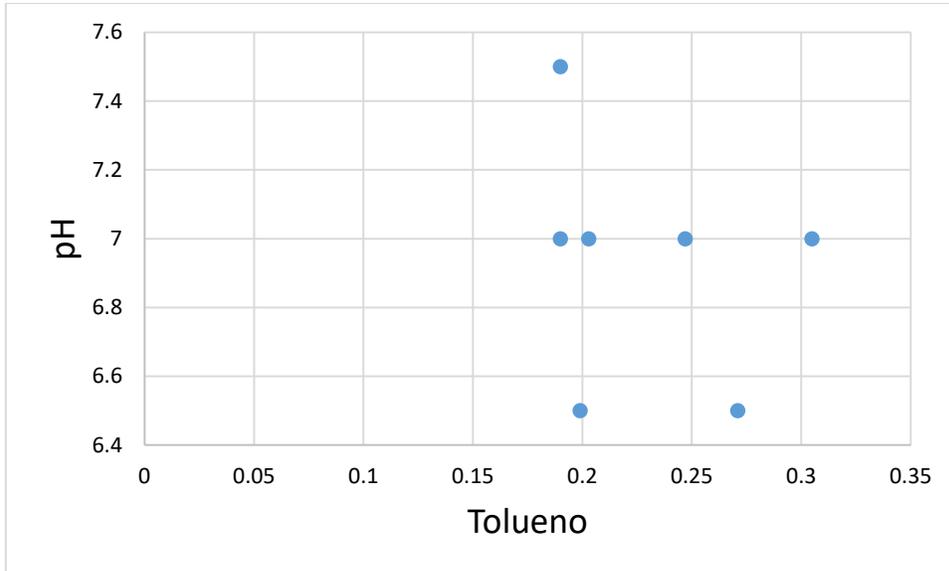
- DQO vs Benceno



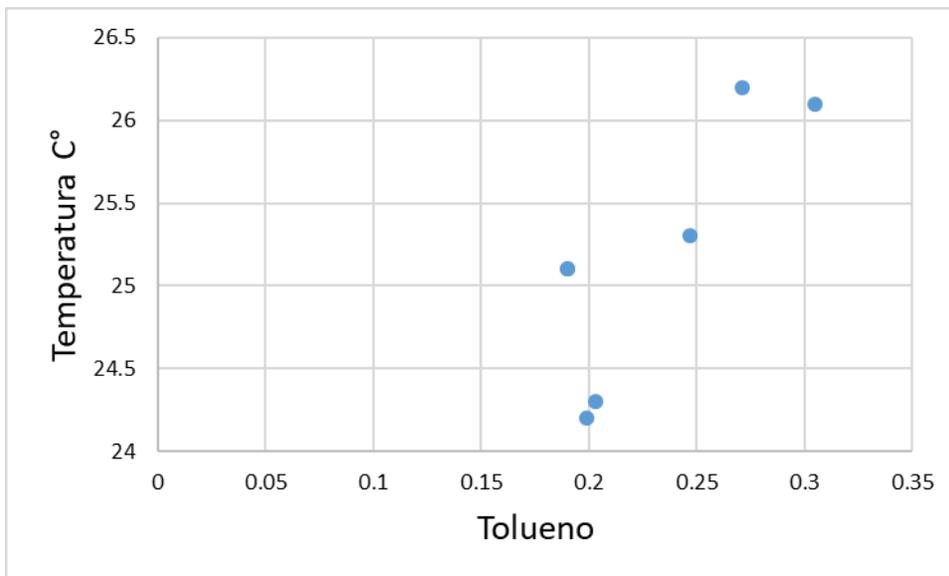
Anexo B

Parámetros Físicoquímicos vs Tolueno correspondientes a Agua Subterránea

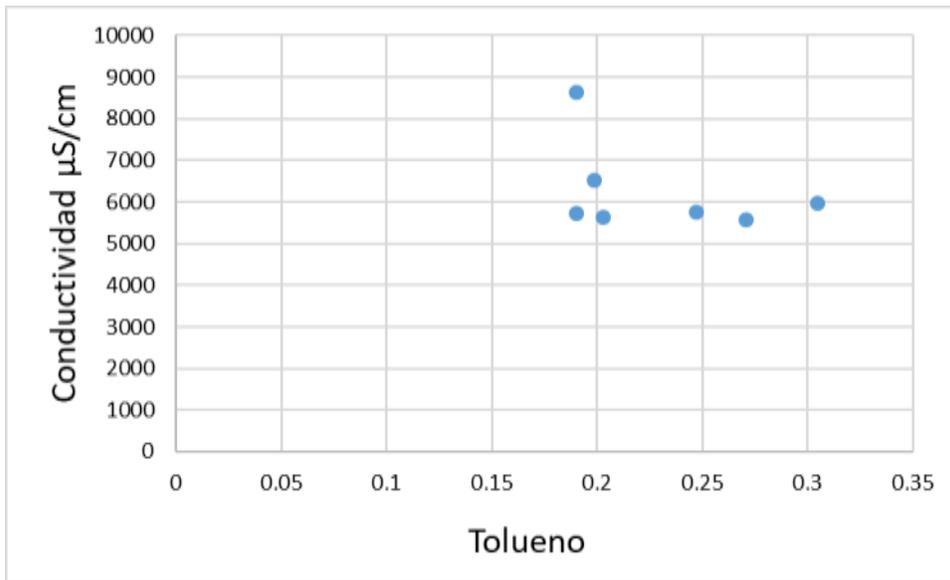
- pH vs Benceno



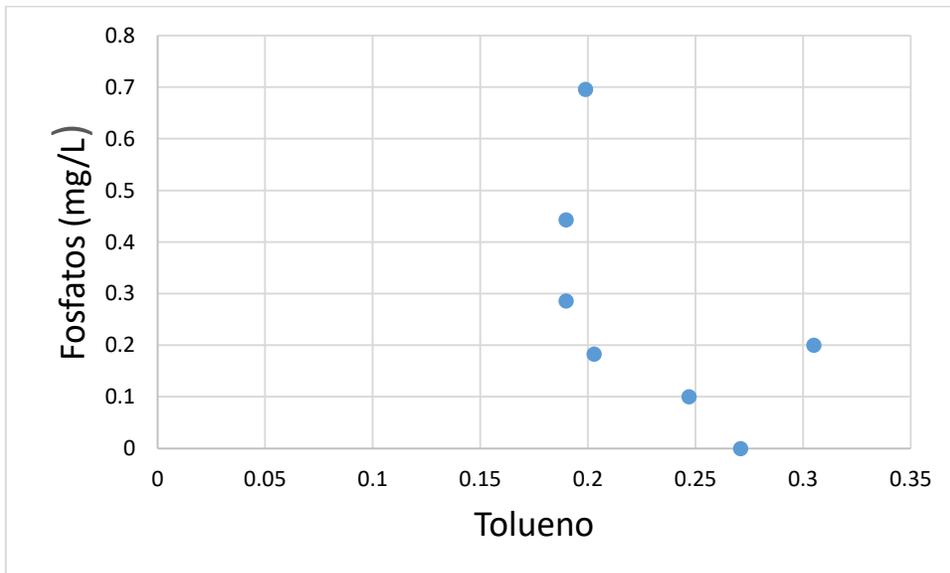
- Temperatura vs Benceno



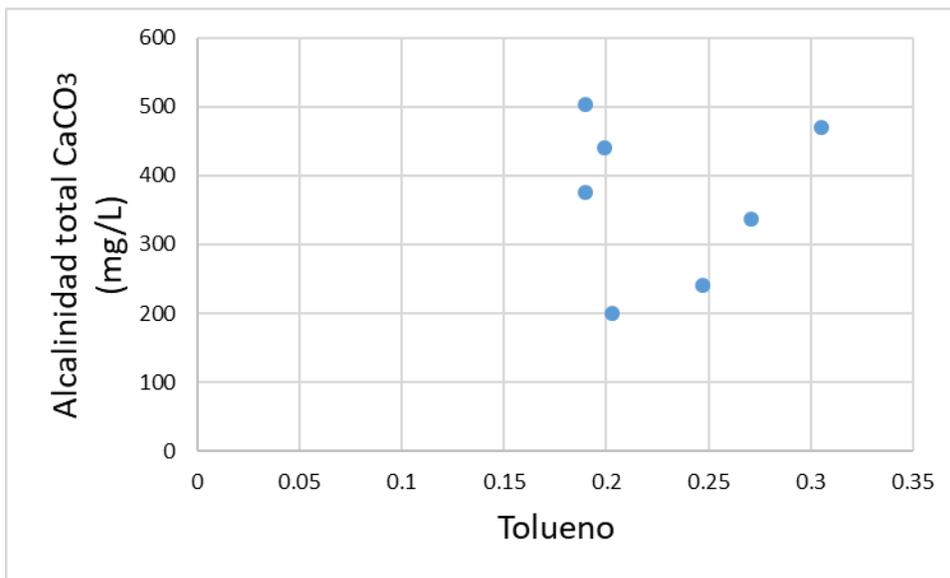
- Conductividad vs Benceno



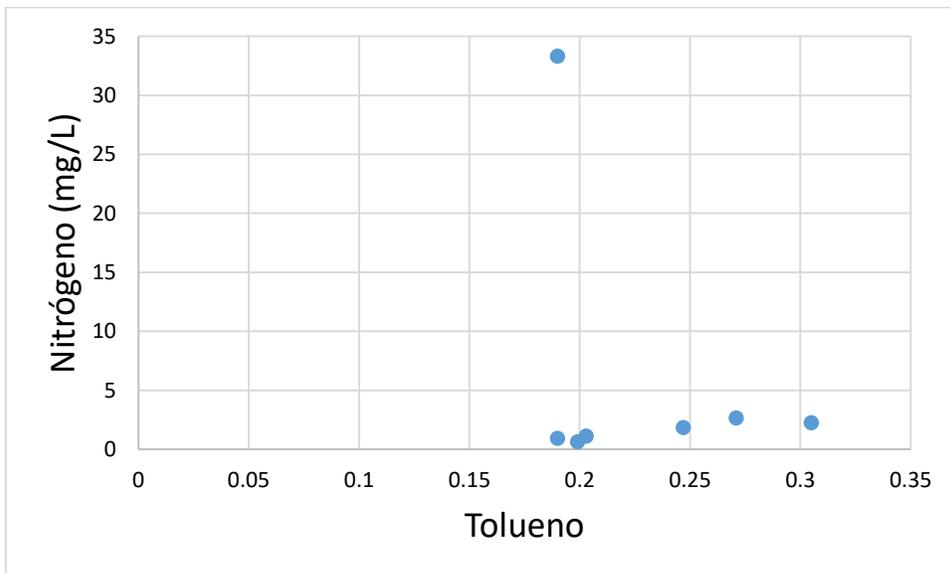
- Fosfatos vs Benceno



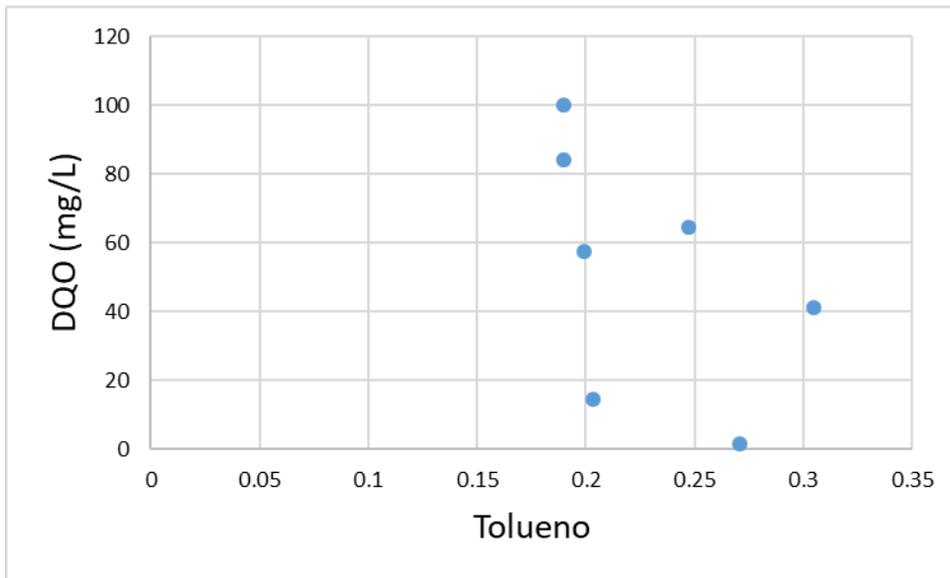
- Alcalinidad como CaCO_3 vs Benceno



- Nitrógeno Total vs Benceno



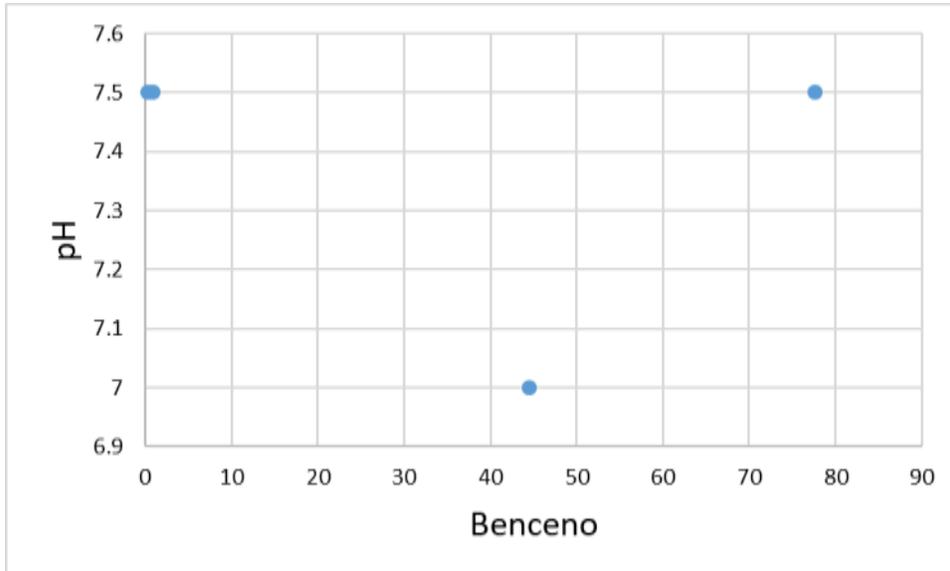
- DQO vs Benceno



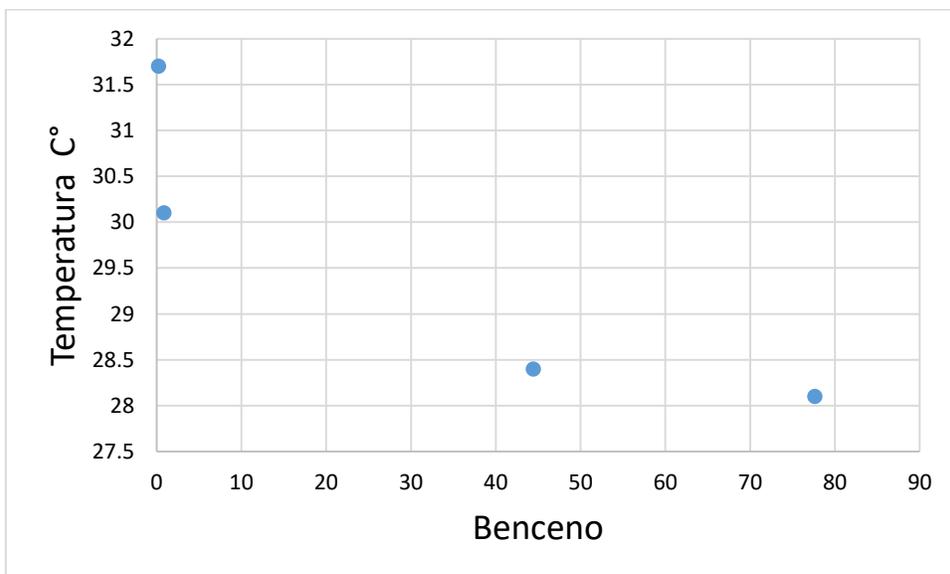
Anexo C

Parámetros Físicoquímicos vs Benceno correspondientes a Agua Superficial

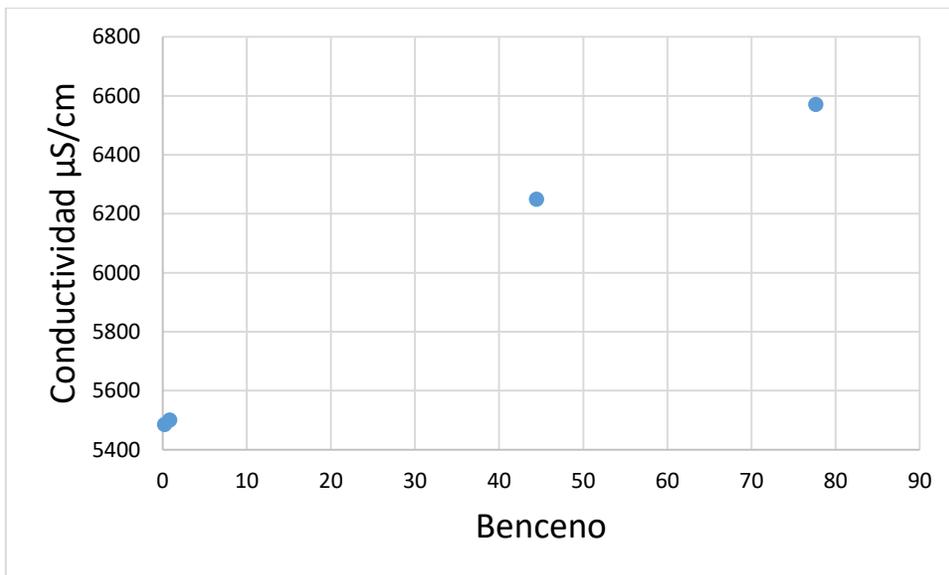
- pH vs Benceno



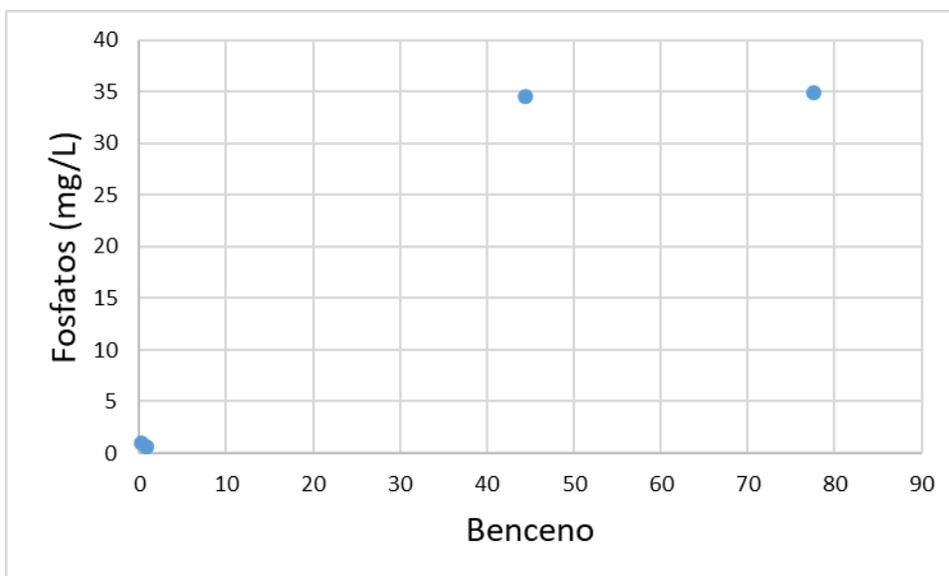
- Temperatura vs Benceno



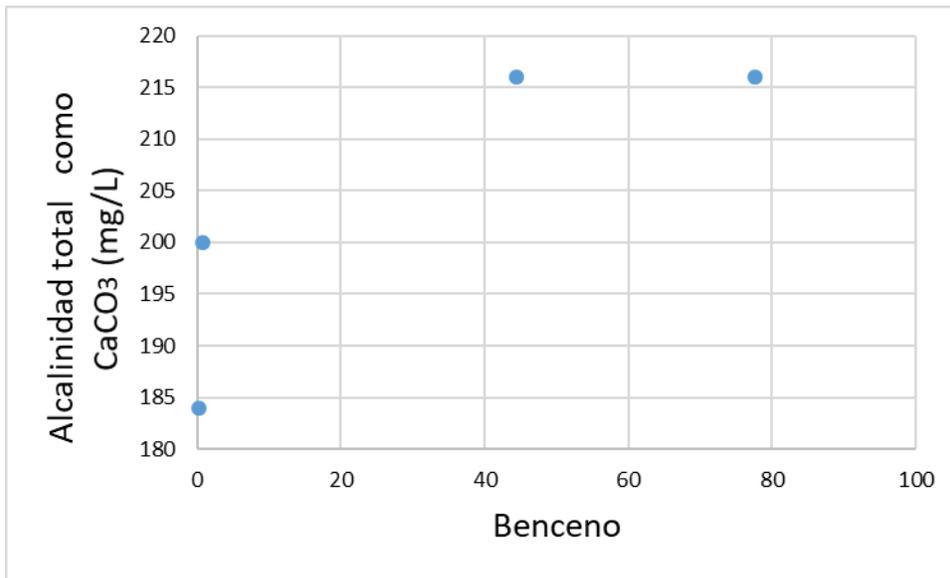
- Conductividad vs Benceno



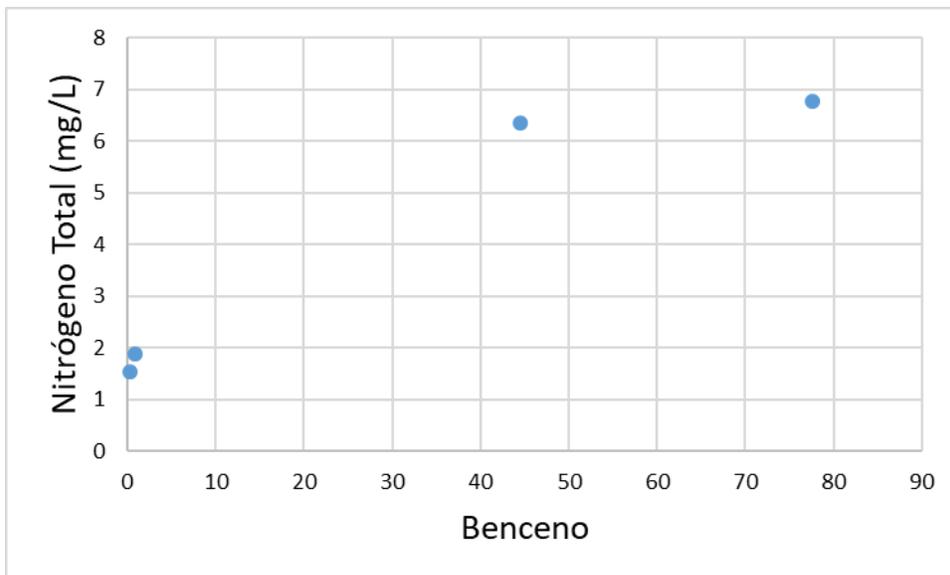
- Fosfatos vs Benceno



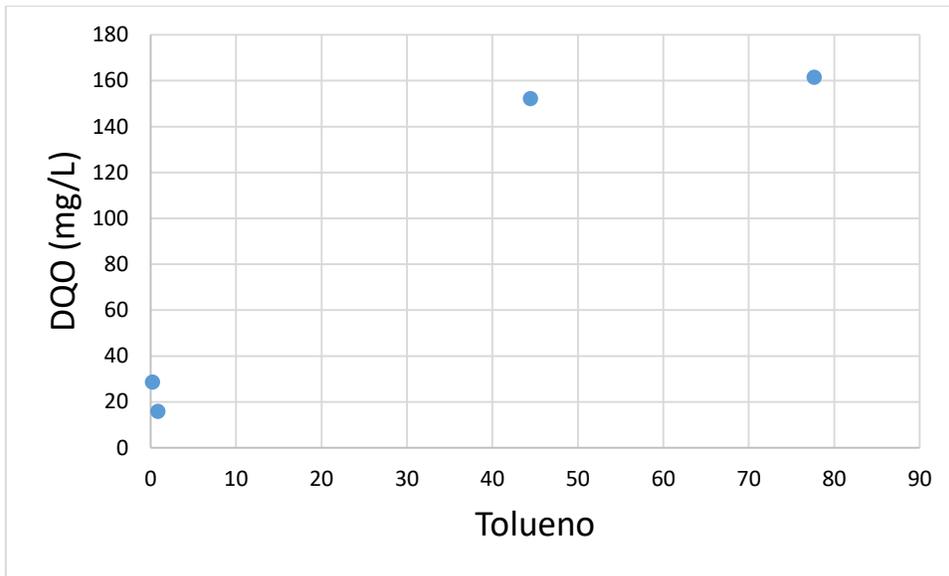
- Alcalinidad como CaCO_3 vs Benceno



- Nitrógeno Total vs Benceno



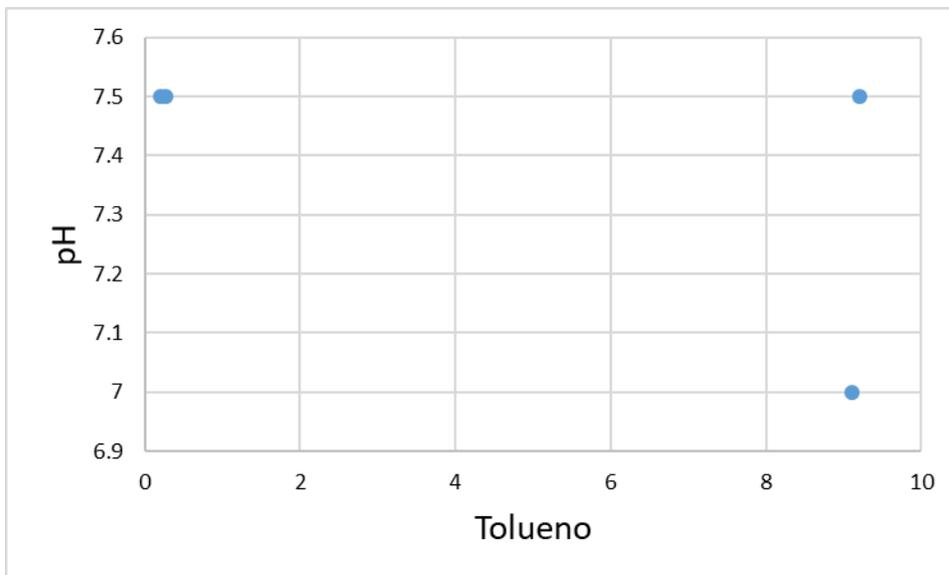
- DQO vs Benceno



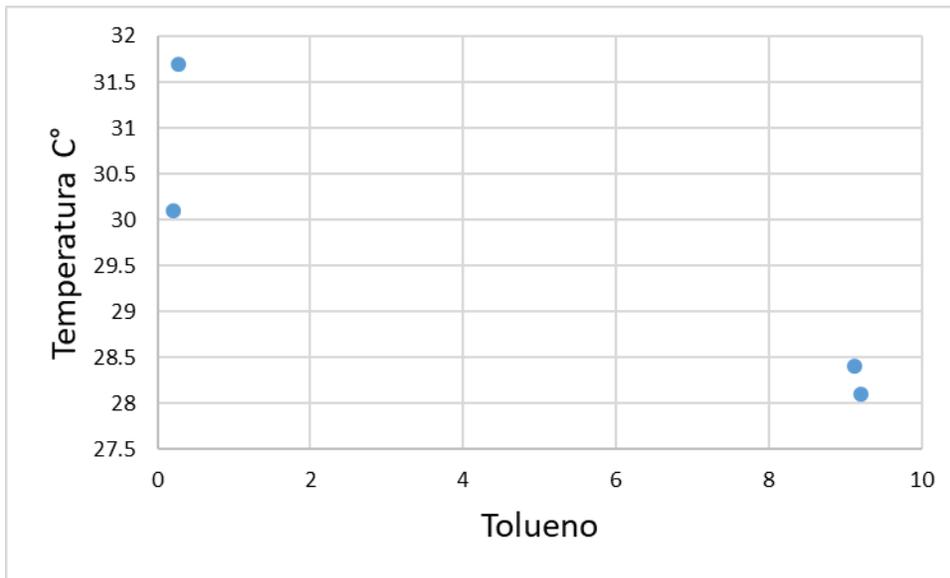
Anexo D

Parámetros Físicoquímicos vs Tolueno correspondientes a Agua Superficial

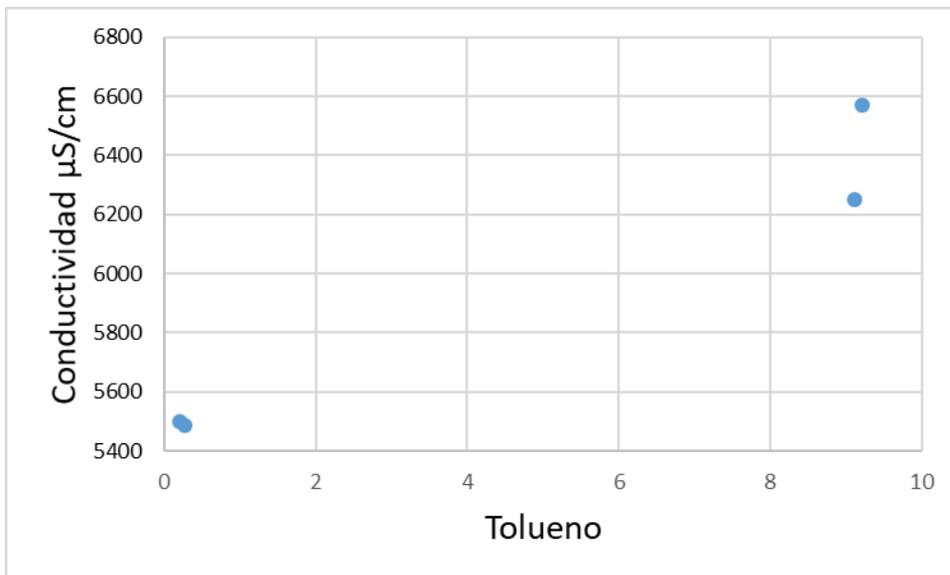
- pH vs Tolueno



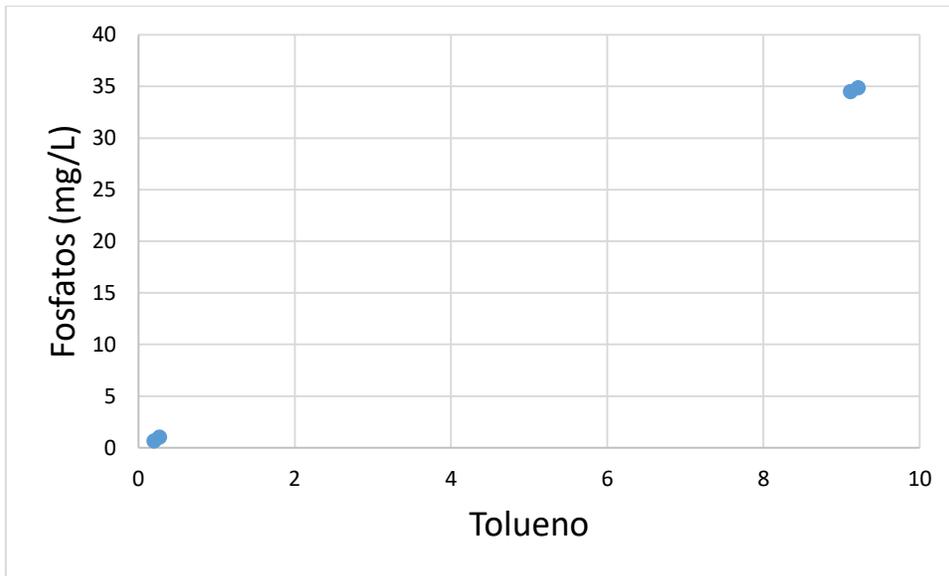
- Temperatura vs Tolueno



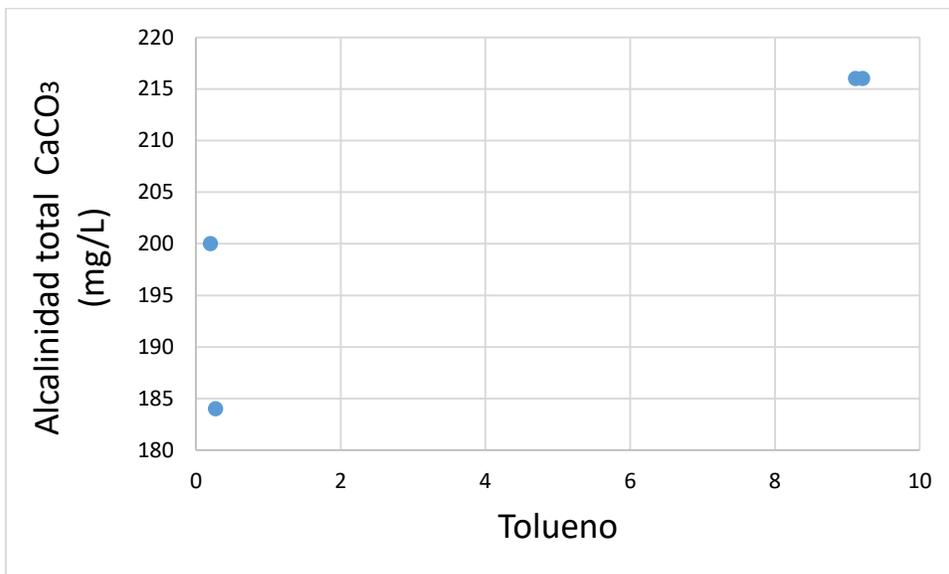
- Conductividad vs Tolueno



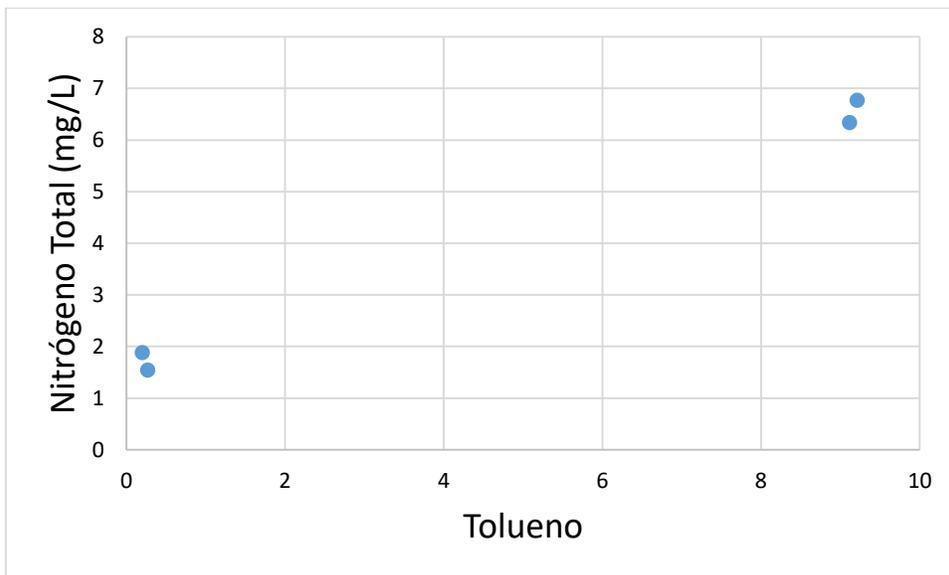
- Fosfatos vs Tolueno



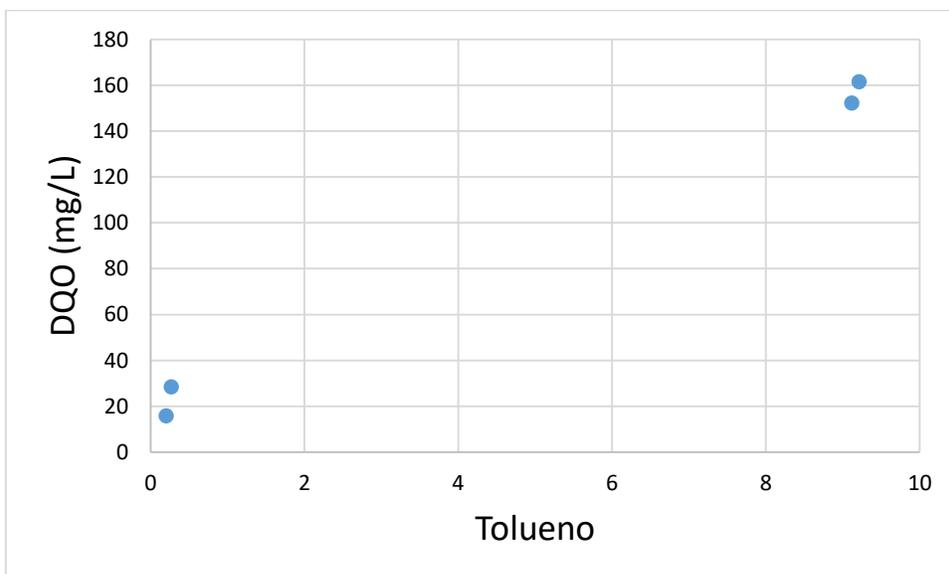
- Alcalinidad como CaCO₃ vs Tolueno



- Nitrógeno Total vs Tolueno



- DQO vs Tolueno



Anexo E

- Resultados análisis fisicoquímicos

Clave del pozo	Conductividad $\mu\text{S/cm}$	Temperatura a $^{\circ}\text{C}$	pH	Fosfatos (mg/L)	Alcalinidad total CaCO_3	Nitrógeno Total (mg/L)	DQO (mg/L)	Sólidos Totales - ST (mg/L)	Sólidos Totales Volátiles - STV (mg/L)	Sólidos Suspendedos Toales - SST (mg/L)	Sólidos Suspendedos totales volátiles - SSV (mg/L)	Sólidos Disueltas Totales SDT (mg/L)
PR-1	5906	26	6.44	0.25	464.5	1.93	63.46	980	200	26.7	73.3	953.3
PR-2	5847	26.5	6.22	0.45	399.47	7.7	122.35	990	235	20	80	970
PR-3	5577	25.8	6.88	0	427.34	3.87	204.9	575	175	46.7	100	528.3
PR-4	5573	24.8	6.79	42.08	287.99	2.04	110.93	1585	195	6.7	53.3	1578.3
PR-5	6493	24.5	6.99	0.16	344.4	7.84	265.55	610	150	6.7	80	603.3
PR-6	5702	25.4	6.63	0.76	668.88	4.78	452.45	675	115	33.3	86.7	641.7
PR-7	5557	25.3	7.07	1.65	260.12	5.51	250.37	605	130	13.3	73.3	591.7
PR-8	7878	24.4	8.3	0.64	259.53	24.91	457.37	3150	330	6.7	66.7	3143.3
AR-1	6161	19.5	7.67	7.72	204.8	11.56	924.2	1175	180	26.7	73.3	1148.3
AR-2	6138	18.7	7.69	1.43	250.83	13.95	1053.04	1170	190	13.3	73.3	1156.7
AC-1	5460	24.7	8.1	2.55	269.41	10.03	1188.67	550	135	6.7	66.7	543.3
AC-2	5557	22.8	7.92	1.33	297.28	13.83	1295.33	590	195	33.3	73.3	556.7
NOTAS:	Medición In-situ											
	Fecha de muestreo											30-nov-19

Clave del pozo	Conductividad $\mu\text{S}/\text{cm}$		Temperatura $^{\circ}\text{C}$		pH	Fosfatos (mg/L)	Alcalinidad total CaCO_3	Nitrógeno Total (mg/L)	DQO (mg/L)	Sólidos Totales - ST (mg/L)	Sólidos Totales Volátiles - STV (mg/L)	Sólidos Suspendedos Toales - SST (mg/L)	Sólidos Suspendedos totales volátiles - SSV (mg/L)	Sólidos Disueltos Totales SDT (mg/L)
	Sin Datos	Sin Datos	Sin Datos	Sin Datos										
PR-1	5963		26.1		7	0.2	469.3	2.24	41.17	985	170	N/D	100	885
PR-2	Sin Datos		Sin Datos		Sin Datos	Sin Datos	Sin datos	Sin Datos	Sin Datos	Sin Datos	Sin Datos	Sin Datos	Sin Datos	Sin Datos
PR-3	5586		26.2		6.5	N/D	336	2.64	1.77	585	160	N/D	N/D	N/D
PR-4	6536		24.2		6.5	0.696	440	0.63	57.48	1600	210	N/D	60	1540
PR-5	5642		24.3		7	0.183	200	1.09	14.56	395	125	20	N/D	N/D
PR-6	5711		25.1		7	0.443	504	0.91	84.12	725	145	N/D	N/D	N/D
PR-7	5747		25.3		7	0.1	240	1.83	64.49	915	210	N/D	N/D	N/D
PR-8	8624		25.1		7.5	0.286	376	33.31	100.13	4735	690	N/D	60	4675
AR-1	6249		28.4		7	34.5	216	6.34	152.21	1365	180	N/D	N/D	N/D
AR-2	6570		28.1		7.5	34.857	216	6.77	161.46	1225	220	N/D	100	1125
AC-1	5485		31.7		7.5	1.017	184	1.54	28.52	505	100	N/D	N/D	N/D
AC-2	5500		30.1		7.5	0.629	200	1.88	15.77	575	170	N/D	N/D	N/D
NOTAS:	Mediciones in-situ													
	Fecha Muestreo	28-ago-20												

Anexo F

-Resultados Benceno

Aprovechamientos hidráulicos	Concentración benceno (ppm)
PR-1	1.429
PR-3	0.199
PR-4	0.814
PR-5	0.572
PR-6	0.122
PR-7	0.058
PR-8	0.062
AR-1	44.45
AR-2	77.654
AC-1	0.229
AC-2	0.853

-Resultados Tolueno

Aprovechamientos hidráulicos	Concentración tolueno (ppm)
PR-1	0.305
PR-3	0.271
PR-4	0.199
PR-5	0.203
PR-6	0.19
PR-7	0.247
PR-8	0.19
AR-1	9.116
AR-2	9.212
AC-1	0.271
AC-2	0.202