

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**EVOLUCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SU
IMPACTO SOBRE EDIFICACIONES UNIVERSITARIAS (HIDROGEOQUÍMICA E
HIDROGEOLOGÍA)**

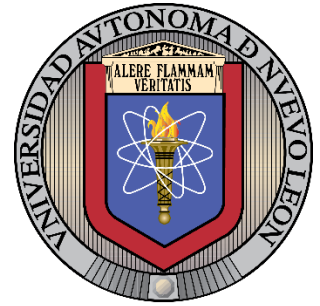
**Por
MARIANA PÉREZ MARTÍNEZ**

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

ENERO DEL 2022



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**EVOLUCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SU
IMPACTO SOBRE EDIFICACIONES UNIVERSITARIAS (HIDROGEOQUÍMICA E
HIDROGEOLOGÍA)**

**Por
MARIANA PÉREZ MARTÍNEZ**

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

**Vo. Bo.
DIRECTOR DE TESIS**

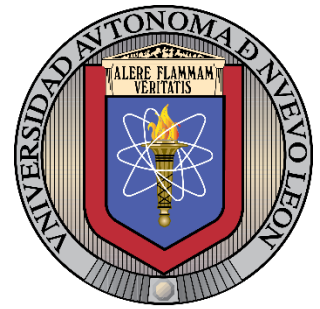
Dr. Héctor de León Gómez

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NL.

ENERO, 2022



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**EVOLUCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SU
IMPACTO SOBRE EDIFICACIONES UNIVERSITARIAS (HIDROGEOQUÍMICA E
HIDROGEOLOGÍA)**

**Por
MARIANA PÉREZ MARTÍNEZ**

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

**Vo. Bo.
COMITÉ DE REVISIÓN**

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

**Dr. Jorge M. Rivera Torres
Co-Director**

**Dr. Arquímedes Cruz López
Asesor interno**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NL.

ENERO, 2022



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

2022/01/09

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 **“EVOLUCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SU IMPACTO SOBRE EDIFICACIONES UNIVERSITARIAS (HIDROGEOQUÍMICA E HIDROGEOLOGÍA)”**, que presenta la **ING. MARIANA PÉREZ MARTÍNEZ**, 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



EDUCACIÓN DE CALIDAD PARA TRANSFORMAR Y
TRANSCENDER EN BENEFICIO DE LA HUMANIDAD

Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
Tels. (81) 14424400 ext. 4448, 8329 4000 ext. 7216, 7234
www.ingenieriacivil.uanl.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

20 de enero del 2022.

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 **“EVOLUCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SU IMPACTO SOBRE EDIFICACIONES UNIVERSITARIAS (HIDROGEOQUÍMICA E HIDROGEOLOGÍA)”**, que presenta la **ING. MARIANA PÉREZ MARTÍNEZ**, 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. Jorge Maurilio Rivera Torres

Evaluador





UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

FECHA: 2022/01/14

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 “**EVOLUCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SU IMPACTO SOBRE EDIFICACIONES UNIVERSITARIAS (HIDROGEOQUÍMICA E HIDROGEOLOGÍA)**”, que presenta la **ING. MARIANA PÉREZ MARTÍNEZ**, 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. Arquímedes Cruz López

Evaluador



DEDICATORIA

A mis padres, Leonardo Pérez Barrios y Ana Martínez Escalante, quienes me han apoyado siempre. Los amo, son lo más importante en mi vida.

A mi mejor amiga, Georgina Guadalupe Rodríguez Jasso †, a quien sigo y seguiré recurriendo espiritualmente para solicitar fortaleza. Quien aún alegra mis días y me visita en sueños.

A mi novio, Adonnys Isael Saucedo Reyes, por su apoyo incondicional durante toda mi preparación profesional.

A mi hermana, Alejandra Carolina Pérez Martínez, que me hizo más amena la pandemia por el Covid-19 ya que fue mi compañera de home office.

A mis sobrinos, Cristian y Regina, los amo. ¡Siempre los voy a proteger!

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Facultad de Ingeniería Civil-UANL y al departamento de Estudios de Posgrado e Investigación, por brindar su apoyo en todo momento para el desarrollo profesional de sus estudiantes.

Al Dr. Héctor de León Gómez, por la dedicación y el apoyo brindado en el desarrollo de la presente tesis.

Al comité evaluador de esta tesis durante mi estancia en la maestría, Dr. Carlos Joel Ábrego Góngora, Dr. Víctor Hugo Guerra Cobián y Dr. Ricardo Alberto Cavazos González; por sus asertivos comentarios y recomendaciones para el beneficio de la presente investigación.

Al comité de revisión de tesis, Dr. Jorge Maurilio Rivera Torres y Dr. Arquímedes Cruz López; por su apoyo, tiempo y consejos.

Al departamento de mecánica de suelos, en especial al M.E.C. Rodolfo Acosta Vázquez por su apoyo con maquinaria y equipo para destapar los pozos necesarios en esta investigación.

Al director de la Facultad de Ingeniería Civil, Dr. Ricardo González Alcorta y al subdirector de vinculación, Dr. Adrián Leonardo Ferriño Fierro; por la autorización, los fondos y la maquinaria para la elaboración de un pozo de sondeo en la Facultad de Ingeniería Civil; para fines de esta tesis.

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

A PAICYT-2021, por brindar los fondos necesarios para llevar a cabo esta investigación.

A mis compañeros de la maestría, M.C. Reynaldo Reyes y Marissa De la Fuente, que me brindaron su apoyo siempre.

A mi amiga Evelyn Valdés, por su compañía y apoyo.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que me apoyaron de manera directa o indirecta en el desarrollo de la presente tesis.

RESUMEN

El campus de la Ciudad Universitaria (CU) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), se ve afectado tanto por contaminación industrial como por contaminación antropogénica. En la presente investigación, se pretende representar la evolución de los contaminantes en el agua subterránea desde el año 2016 hasta el año 2021, con la finalidad de determinar el impacto ambiental que tienen las actividades industriales y antropogénicas sobre la calidad del agua subterránea en el campus, así como la repercusión del agua subterránea contaminada sobre las cimentaciones de la Torre de la Rectoría, el Estadio Universitario de la UANL y el Instituto de Ingeniería Civil.

Para el desarrollo metodológico, se realizó el muestreo de los aprovechamientos hidráulicos (hidrogeoquímica) y la toma de muestras de suelo dentro de la zona de estudio en épocas de sequía. También, se realizaron mediciones del nivel freático en las distintas épocas del año (hidrogeología). Las muestras fueron analizadas en el laboratorio Certificado "ActLabs Canadá" mediante la metodología de espectrometría de masas. La representación de la evolución de las propiedades del acuífero se realizó mediante mapas temáticos de distribución y cartas piezométricas.

El acuífero en estudio se clasifica como acuífero de poros y gravas, que subyace al acuífero de grietas de la formación Méndez. Se encontró la presencia de al menos 59 metales en el agua subterránea provenientes muy probablemente de las industrias del acero Ternium, Ferromex, entre otras. De los iones encontrados; el hierro (Fe^{3+}), aluminio (Al^{3+}) y manganeso (Mn^{2+}) superaron los límites máximos permisibles (LMP) de las normativas ambientales. Además, los cloruros (Cl^-) y sulfatos (SO_4^{2-}), superan también, los LMP. El grado de afectación del agua subterránea hacia las cimentaciones de la Torre de la Rectoría, el Estadio Universitario y el Instituto de Ingeniería Civil, se estimó comparando las concentraciones de los contaminantes con las normativas nacionales e internacionales de construcción correspondientes.

Los resultados de la presente investigación son un aporte a la investigación relacionada con la caracterización y evolución de contaminantes en el agua subterránea, así como de exposición de estructuras de acero/concreto a entornos agresivos resultantes de la contaminación industrial y antropogénica.

ABSTRACT

The Ciudad Universitaria (CU) campus of the Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) is affected by both industrial pollution and anthropogenic pollution. This research aims to represent the evolution of contaminants in groundwater from 2016 to 2021, to determine the environmental impact of industrial and anthropogenic activities on the quality of groundwater on campus, as well as such as the impact of contaminated groundwater on the foundations of the Tower of The Rectory of the UANL, Institute of Civil Engineering of the UANL and the UANL Estadio Universitario. For the methodological development, the sampling of the hydraulic uses (hydrogeochemistry) and the taking of soil samples were carried out within the study area in times of drought. Also, measurements of the water table were made at different times of the year (hydrogeology). The samples were analyzed in the Certified Laboratory "ActLabs Canada" by mass spectrometry methodology. The representation of the evolution of the aquifer properties was carried out using thematic distribution maps and piezometric charts. The aquifer under study is classified as a pore and gravel aquifer, which underlies the crevice aquifer of the Méndez formation. The presence of at least 59 heavy metals was found in groundwater, most likely from the Ternium and Ferromex steel industries, among others. Of the ions found; iron (Fe^{3+}), aluminum (Al^{3+}) and manganese (Mn^{2+}) exceeded the maximum permissible limits (PML) of environmental regulations. In addition, chlorides (Cl^-) and sulfates (SO_4^{2-}), also exceed LMP. The degree of affectation of the groundwater towards the foundations of the Tower of The Rectory of the UANL, Institute of Civil Engineering of the UANL and the UANL was estimated by comparing the concentrations of the pollutants with the corresponding national and international construction regulations. The results of this research are a contribution to research related to the characterization and evolution of contaminants in groundwater, as well as the exposure of steel / concrete structures to aggressive environments resulting from industrial and anthropogenic contamination.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 (GENERALIDADES)	9
1.1. INTRODUCCIÓN	9
1.2. ANTECEDENTES.....	22
1.3. JUSTIFICACIÓN DE ESTE ESTUDIO.....	25
1.4. HIPÓTESIS	26
1.5. OBJETIVOS.....	27
CAPÍTULO 2 (MARCO TEÓRICO)	28
2.1. FISIOGRAFÍA.....	28
2.2. HIDROLOGÍA.....	28
2.3. SEQUÍA	32
2.4. GEOLOGÍA.....	33
2.5. HIDROGEOLOGÍA.....	36
2.6. HIDROGEOQUÍMICA	38
CAPÍTULO 3 (METODOLOGÍA)	46
3.1. Estudio bibliográfico.....	46
3.2. Análisis de la zona de estudio.....	46
3.2.1. Ubicación de los sitios de muestreo	47
3.2.2. Problemas de la zona de estudio	48
3.2.3. Afectación a las estructuras universitarias.....	50
3.3. Medición del nivel freático y plan de muestreo de muestreo.....	50
3.3.1. Medición del nivel freático	51
3.3.2. Campaña de muestreo	59
3.4. Análisis de laboratorio	63
3.5. Representación piezométrica y de la evolución de las propiedades del acuífero	64
3.6. Evaluación de los resultados con las normas ambientales.....	68
3.7. Relación de los contaminantes con los componentes de las estructuras.....	75
CAPÍTULO 4 (ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS)	77
CAPÍTULO 5 (CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES)	159
BIBLIOGRAFÍA	162
ANEXOS	167

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Aumento de la demanda de agua anual en el mundo (Naciones Unidas, 2021).....	10
Figura 2. Usos del agua en México (CONAGUA, 2018).....	11
Figura 3. Esquema del ciclo hidrológico (J. Gómez & Sanz, 2013).....	12
Figura 4. Contenido de agua dulce y salada en el mundo (ONU, 2019).....	13
Figura 5. Capilaridad. Adaptada de (Michigan State University, 1991).....	15
Figura 6. Evolución de matrícula UANL (Guzmán, 2021).....	16
Figura 7. Fotografía de construcción del Estadio Universitario (Cervantes, 1960).....	18
Figura 8. Cimentaciones del Estadio Universitario escala 1:100 (Cervantes, 1960).....	18
Figura 9. Cimentaciones edificio de la Rectoría escala 1:100 (Cervantes, 1960).....	19
Figura 10. Cimentaciones del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL (Garza, 1975).....	19
Figura 11. Representación de cimentación del Estadio Universitario (elaboración propia, 2021).....	20
Figura 12. Representación de cimentación de la Torre de la Rectoría (elaboración propia, 2021).....	21
Figura 13. Representación de cimentaciones del Instituto de Ingeniería Civil (elaboración propia, 2021).....	21
Figura 14. Cuenca Río Bravo (CONAGUA, 2015). Figura 15. Subcuenca del Río San Juan (CONAGUA, 2015).....	29
Figura 16. Arroyo del Topo Chico (Pérez, 2019).....	29
Figura 17. Temperatura y lluvia media en Monterrey. Adaptada de (HikersBay, 2018).....	30
Figura 18. Registro de lluvias desde el año 2016 hasta el año 2021 (elaboración propia, 2021).....	31
Figura 19. Perfil estratigráfico de la zona de estudio (Michalzik, 1988).....	33
Figura 20. Perfil estratigráfico dentro del área de estudio, (Silva et al, 2015).....	35
Figura 21. Sección del perfil estratigráfico (Pérez, 2019).....	35
Figura 22. Presencia de oxidación en el acuífero (Pérez, 2019).....	35
Figura 23. Tipos litológicos de acuíferos (Werner, 1996).....	37
Figura 24. Tipos de corrosión en armaduras de concreto (Andrade, 1989).....	41
Figura 25. Relación entre acidez del agua con metales que producen corrosión en armaduras de concreto (Calleja, 1966).....	45
Figura 26. Esquema metodológico (elaboración propia, 2021).....	46
Figura 27. Zona de estudio con sus sitios de muestreo identificados (elaboración propia, 2021).....	47
Figura 28. Industrias metalúrgicas alrededor de la zona de estudio (Google, n.d.).....	49
Figura 29. a) Línea dos del metro con presencia de Hollín., b) Zoom a elemento del metro línea 2 (Pérez, 2019).....	49
Figura 30. Desechos fecales posteriores a un evento masivo en el Estadio Universitario (Pérez, 2019).....	49
Figura 31. Elementos de acero de la estructura de la Torre de la Rectoría afectados por la corrosión (Pérez, 2019).....	50
Figura 32. Equipo necesario para realizar la medición del nivel freático (De la fuente, 2021).....	51
Figura 33. Medición del nivel freático (elaboración propia, 2021).....	52
Figura 34. Muestreo de agua subterránea en aprovechamientos hidráulicos (2021).....	59
Figura 35. Muestras de arcilla de la zona de estudio (elaboración propia, 2021).....	62
Figura 36. Muestreo de suelo en zona de estudio (elaboración propia, 2021).....	62
Figura 37. Gráfico de conductividad eléctrica en las mediciones realizadas (elaboración propia, 2021).....	78
Figura 38. temperaturas en las mediciones realizadas (elaboración propia, 2021).....	79
Figura 39. Niveles de pH (elaboración propia, 2021).....	80
Figura 40. Registro de Niveles Piezométricos (elaboración propia, 2021).....	81
Figura 41. Piezometría mayo 2016 (elaboración propia, 2021).....	83
Figura 42. Piezometría julio 2016 (elaboración propia 2021).....	83
Figura 43. Piezometría febrero 2017 (elaboración propia 2021).....	83
Figura 44. Piezometría mayo 2017 (elaboración propia 2021).....	83
Figura 45. Piezometría mayo 2018 (elaboración propia 2021).....	83
Figura 46. Piezometría agosto 2018 (elaboración propia 2021).....	83
Figura 47. Piezometría diciembre 2018 (elaboración propia 2021).....	84
Figura 48. Piezometría febrero 2019 (elaboración propia 2021).....	84

Figura 49. Piezometría marzo 2019 (elaboración propia 2021).	84
Figura 50. Piezometría marzo 2019 (elaboración propia 2021).	84
Figura 51. Piezometría mayo 2019 (elaboración propia 2021).	84
Figura 52. Piezometría marzo 2019 (elaboración propia 2021).	84
Figura 53. Piezometría septiembre 2019 (elaboración propia 2021).	85
Figura 54. Piezometría julio 2019 (elaboración propia 2021).	85
Figura 55. Piezometría noviembre 2020 (elaboración propia 2021).	85
Figura 56. Piezometría enero 2021 (elaboración propia 2021).	85
Figura 57. Piezometría mayo 2021 (elaboración propia 2021).	85
Figura 58. Piezometría junio 2021 (elaboración propia 2021).	85
Figura 59. Piezometría septiembre 2021 (elaboración propia 2021).	86
Figura 60. Piezometría octubre 2021 (elaboración propia 2021).	86
Figura 61. Concentraciones de Al^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	87
Figura 62. Concentraciones de Sb^{5+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	87
Figura 63. Mapas temáticos de distribución en representación del Al^{3+} y del Sb^{5+} (elaboración propia, 2021).	88
Figura 64. Concentraciones de As^{5+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	89
Figura 65. Concentraciones de Ba^{2+} en mg/L. (elaboración propia, 2021).	89
Figura 66. Mapas temáticos de distribución en representación del As^{5+} y del Ba^{2+} (elaboración propia, 2021).	90
Figura 67. Concentraciones de Be^{2+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	91
Figura 68. Concentraciones de Bi^{5+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	91
Figura 69. Mapas temáticos de distribución en representación del Be^{2+} y del Bi^{5+} (elaboración propia, 2021).	92
Figura 70. Concentraciones de Cd^{2+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	93
Figura 71. Concentraciones de Ca^{2+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	93
Figura 72. Mapas temáticos de distribución en representación del Cd^{2+} y del Ca^{2+} (elaboración propia, 2021).	94
Figura 73. Concentraciones de Ce^{4+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	95
Figura 74. Concentraciones de Cs^{+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	95
Figura 75. Mapas temáticos de distribución en representación del Ce^{4+} y del Cs^{+} (elaboración propia, 2021).	96
Figura 76. Concentraciones de Zr^{4+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	97
Figura 77. Concentraciones de Cu^{2+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	97
Figura 78. Mapas temáticos de distribución en representación del Zr^{4+} y del Cu^{2+} (elaboración propia, 2021).	98
Figura 79. Concentraciones de Co^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	99
Figura 80. Concentraciones de Cr^{6+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	99
Figura 81. Mapas temáticos de distribución en representación del Co^{3+} y del Cr^{6+} (elaboración propia, 2021).	100
Figura 82. Concentraciones de Sc^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	101
Figura 83. Concentraciones de Sr^{2+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	101
Figura 84. Mapas temáticos de distribución en representación del Sc^{3+} y del Sr^{2+} (elaboración propia, 2021).	102
Figura 85. Concentraciones de Sn^{4+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	103
Figura 86. Concentraciones de Eu^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	103
Figura 87. Mapas temáticos de distribución en representación del Sn^{4+} y del Eu^{3+} (elaboración propia, 2021).	104
Figura 88. Concentraciones de Gd^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	105
Figura 89. Concentraciones de Ga^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	105
Figura 90. Mapas temáticos de distribución en representación del Gd^{3+} y del Ga^{3+} (elaboración propia, 2021).	106
Figura 91. Concentraciones de Ge^{4+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	107
Figura 92. Concentraciones de Fe^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	107

Figura 93. Mapas temáticos de distribución en representación del Ge^{4+} y del Fe^{3+} (elaboración propia, 2021).	108
Figura 94. Concentraciones de Y^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	109
Figura 95. Concentraciones de La^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	109
Figura 96. Mapas temáticos de distribución en representación del Y^{3+} y del La^{3+} (elaboración propia, 2021).	110
Figura 97. Concentraciones de Li^+ en mg/L (elaboración propia, 2021).	111
Figura 98. Concentraciones de Lu^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	111
Figura 99. Mapas temáticos de distribución en representación del Li^+ y del Lu^{3+} (elaboración propia, 2021).	112
Figura 100. Concentraciones de Mg^{2+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	113
Figura 101. Concentraciones de Mn^{2+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	113
Figura 102. Mapas temáticos de distribución en representación del Mg^{2+} y del Mn^{2+} (elaboración propia, 2021).	114
Figura 103. Concentraciones de Hg^{2+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	115
Figura 104. Concentraciones de Nd^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	115
Figura 105. Mapas temáticos de distribución en representación del Hg^{2+} y del Na^{3+} (elaboración propia, 2021).	116
Figura 106. Concentraciones de Mo^{6+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	117
Figura 107. Concentraciones de Nb^{5+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	117
Figura 108. Mapas temáticos de distribución en representación del Mo^{6+} y del Nb^{5+} (elaboración propia, 2021).	118
Figura 109. Concentraciones de Ni^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	119
Figura 110. Concentraciones de K^+ en mg/L (elaboración propia, 2021).	119
Figura 111. Mapas temáticos de distribución en representación del Níquel y del Potasio (elaboración propia, 2021).	120
Figura 112. Concentraciones de Ag^+ en mg/L (elaboración propia, 2021).	121
Figura 113. Concentraciones de Rb^+ en mg/L (elaboración propia, 2021).	121
Figura 114. Mapas temáticos de distribución en representación de la Ag^+ y del Rb^+ (elaboración propia, 2021).	122
Figura 115. Concentraciones de Se^{6+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	123
Figura 116. Concentraciones de Si^{4+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	123
Figura 117. Mapas temáticos de distribución en representación del Se^{6+} y de la Si^{4+} (elaboración propia, 2021).	124
Figura 118. Concentraciones de Na^+ en mg/L (elaboración propia, 2021).	125
Figura 119. Concentraciones de Te^{6+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	125
Figura 120. Mapas temáticos de distribución en representación del Na^+ y del Te^{6+} (elaboración propia, 2021).	126
Figura 121. Concentraciones de Ti^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	127
Figura 122. Concentraciones de Ti^{4+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	127
Figura 123. Mapas temáticos de distribución en representación del Ti^{3+} y del Ti^{4+} (elaboración propia, 2021).	128
Figura 124. Concentraciones de Tb^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	129
Figura 125. Concentraciones de U^{6+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	129
Figura 126. Mapas temáticos de distribución en representación del Tb^{3+} y del U^{6+} (elaboración propia, 2021).	130
Figura 127. Concentraciones de V^{5+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	131
Figura 128. Concentraciones de W^{6+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	131
Figura 129. Mapas temáticos de distribución en representación del V^{5+} y del W^{6+} (elaboración propia, 2021).	132
Figura 130. Concentraciones de Zn^{2+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	133
Figura 131. Concentraciones de In^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	133

Figura 132. Mapas temáticos de distribución en representación del Zn^{2+} y del In^{3+} (elaboración propia, 2021).	134
Figura 133. Concentraciones de Th^{4+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	135
Figura 134. Concentraciones de Sm^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	135
Figura 135. Mapas temáticos de distribución en representación del Th^{4+} y del Sm^{3+} (elaboración propia, 2021).	136
Figura 136. Concentraciones de Pr^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	137
Figura 137. Concentraciones de Pb^{4+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	137
Figura 138. Mapas temáticos de distribución en representación del Pr^{3+} y del Pb^{4+} (elaboración propia, 2021).	138
Figura 139. Concentraciones de Yb^{3+} en mg/L. (elaboración propia, 2021).	139
Figura 140. Concentraciones de Ho^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	139
Figura 141. Mapas temáticos de distribución en representación del Yb^{3+} y del Ho^{3+} (elaboración propia, 2021).	140
Figura 142. Concentraciones de Hf^{4+} mg/L (elaboración propia, 2021).	141
Figura 143. Concentraciones de Er^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	141
Figura 144. Mapas temáticos de distribución en representación del Hf^{4+} y del Er^{3+} (elaboración propia, 2021).	142
Figura 145. Concentraciones de Dy^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	143
Figura 146. Concentraciones de Tm^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	143
Figura 147. Mapas temáticos de distribución en representación del Dy^{3+} y del Tm^{3+} (elaboración propia, 2021).	144
Figura 148. Concentraciones de Ta^{5+} en mg/L (elaboración propia, 2021).	145
Figura 149. Mapa temático de distribución en representación del Ta^{5+} (elaboración propia, 2021).	146
Figura 150. Concentraciones de metales en agua subterránea (elaboración propia, 2021).	147
Figura 151. Concentraciones de metales en agua subterránea Zoom 1 (elaboración propia, 2021).	148
Figura 152. Concentraciones de metales en agua subterránea Zoom 2 (elaboración propia, 2021).	148
Figura 153. Concentraciones de metales en el suelo (elaboración propia, 2021).	149
Figura 154. Concentraciones de metales en el suelo Zoom 1 (elaboración propia, 2021).	150
Figura 155. Concentraciones de metales en el suelo Zoom 2 (elaboración propia, 2021).	150
Figura 156. Representación de los niveles piezométricos en la zona de estudio (elaboración propia, 2021).	151
Figura 157. Evolución de concentración de Na^{+} desde el año 2017 hasta 2021 (elaboración propia, 2021).	154
Figura 158. Evolución de la concentración de K^{+} desde el año 2017 hasta el 2021 (elaboración propia, 2021).	155
Figura 159. Evolución de la concentración de Ca^{2+} desde el año 2017 hasta el año 2021 (elaboración propia, 2021).	156
Figura 160. Evolución de Mg^{2+} desde el año 2017 hasta el año 2021 (elaboración propia, 2021).	156
Figura 161. Evolución de concentraciones de Al^{3+} desde el año 2017 hasta el 2021 (elaboración propia, 2021).	157
Figura 162. Evolución de concentraciones de Mn^{2+} desde el año 2017 hasta el 2021 (elaboración propia, 2021).	158
Figura 163. Evolución de concentraciones de Fe^{3+} desde el año 2017 hasta el 2021 (elaboración propia, 2021).	158

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ascensos capilares máximos en diferentes terrenos y suelos (Custodio & LLamas, 1983).	16
Tabla 2. Elementos que sobrepasan los LMP en mg/L. Adaptado de (García, 2017).	23
Tabla 3. Metales cercanos a los LMP en mg/L. Adaptado de (Pérez, 2019).	24
Tabla 4. Clases de exposición ambiental (“NMX-C-403-ONNCCE-1999,” n.d.)	42
Tabla 5. Requisitos de durabilidad según la clase de exposición (“NMX-C-403-ONNCCE-1999,” n.d.).	42
Tabla 6. Especificaciones contra el ataque químico de agentes agresivos cuando existen sulfatos (“NMX-C-403-ONNCCE-1999,” n.d.).....	43
Tabla 7. Tipos de cemento requeridos para la exposición del concreto a los sulfatos en el suelo o en agua (ACI 201, 2001).....	43
Tabla 8. Análisis típicos del agua de abastecimiento de las ciudades y agua de mar (ACI 201, 2001).	44
Tabla 9. a) Categorías y clases de exposición; b) Requisitos para el concreto según la clase de exposición (American Concrete Institute, 2008).....	44
Tabla 10. Desglose de simbología para puntos de muestreo (elaboración propia, 2020).....	48
Tabla 11. Datos registrados medición tormenta Fernando, 06/09/2019.	53
Tabla 12. Datos registrados medición Huaracan Hanna, 31/08/2020	53
Tabla 13. Datos registrados medición 27/11/20.	54
Tabla 14. Datos registrados medición 26/01/21.	55
Tabla 15. Datos registrados medición 28/05/21.	55
Tabla 16. Datos registrados medición 21/06/21.	56
Tabla 17. Datos registrados medición 14/09/21.	57
Tabla 18. Datos registrados medición 02/10/21.	57
Tabla 19. Mediciones del nivel freático desde el año 2017 hasta la actualidad (elaboración propia, 2021). ..	58
Tabla 20. Registros de pH (elaboración propia, 2021),	60
Tabla 21. Tabla 21. Niveles piezométricos desde el año 2016 hasta el 2021 (elaboración propia, 2021).....	66
Tabla 22. LMP en aguas (mg/L) establecidos por normas Nacionales e Internacionales (elaboración propia 2021).....	68
Tabla 23. LMP en aguas (mg/L) establecidos por normas Nacionales e Internacionales (elaboración propia 2021).....	70
Tabla 24. LMP en suelos (mg/kg) establecidos por normas Nacionales e Internacionales (elaboración propia, 2021).....	72
Tabla 25. LMP en suelos (mg/kg) establecidos por normas Nacionales e Internacionales (elaboración propia, 2021).....	74
Tabla 26. Cloruros y sulfatos en mg/L. Adaptada de (García 2017).	76
Tabla 27. Calidades del agua de irrigación de acuerdo con su conductividad (Jenkins et al., 1983).	77

CAPÍTULO 1 (GENERALIDADES)

1.1. INTRODUCCIÓN

El Campus de Ciudad Universitaria (CU) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), ha aumentado su matrícula de estudiantes (aproximadamente 215 mil estudiantes en el año 2021), lo que ha provocado el crecimiento y la adaptación de las instalaciones. La demanda de agua y el aumento de producción de desechos por parte de los usuarios de las instalaciones han tenido gran impacto en la calidad del agua subterránea presente en la zona. Otra importante fuente de contaminación son las industrias del acero, debido a que el área de estudio se localiza en una zona industrial, limitada al este por la empresa de acero TERNIUM y al oeste por FERROMEX, entre otras.

Existen antecedentes sobre altas concentraciones de metales, Cl^- y SO_4^{2-} ; suspendidos en el agua subterránea de la zona de estudio (García, 2017; Pérez, 2019). Además, se han reportado afectaciones a las cimentaciones de la Torre de la Rectoría de la UANL a causa de su contacto con el agua subterránea (Pérez, 2019). Por otra parte, (Mora et al., 2017) mencionan que el cambio climático podría modificar el ciclo hidrológico y afectar la cantidad y calidad de los recursos de agua subterránea; por lo cual, es necesario realizar programas anuales de monitoreo para identificar cambios en la química del agua, que puedan ocurrir en el futuro. Debido a los antecedentes de contaminantes presentes en el agua subterránea, a la constante modificación del ciclo hidrológico que cambia las propiedades y los niveles del agua subterránea, así como, de los antecedentes que reportan afectaciones a la Torre de la Rectoría a consecuencia de su exposición al agua subterránea; se requiere evaluar la evolución del agua subterránea en el campus de CU de la UANL, con la finalidad de reportar la evolución de los metales presentes en el agua subterránea, así como las posibles afectaciones a la Torre de la Rectoría, Estadio Universitario e Instituto de Ingeniería Civil por parte de dichos elementos.

Es esencial analizar la calidad química del agua y las variaciones del nivel freático desde los datos más antiguos que se puedan obtener, hasta la actualidad. Dicha información se recaudó a través de bases de datos de la Comisión Nacional

del Agua (CONAGUA), investigaciones previas en la zona de estudio, artículos científicos y mediante el análisis hidrogeológico e hidrogeoquímico de la zona. Para obtener los datos actuales de dicha evolución, se realizaron varios muestreos y mediciones del nivel freático en las épocas (sequía, ordinario y extraordinario) de los años 2020-2021, con la finalidad de obtener una caracterización detallada del acuífero.

Agua en el mundo

El agua es uno de los recursos más importantes para la vida en el planeta. Los seres humanos dependemos de su disponibilidad, tanto para el consumo doméstico, como para el funcionamiento y la continuidad de las actividades agrícolas e industriales. En los últimos años, con la finalidad de producir más alimentos y energía, así como de dotar de agua potable a una población cada vez más numerosa, la demanda por el líquido ha aumentado significativamente (SEMARNAT, 2012).

A nivel mundial, la demanda de agua dulce ha incrementado en los últimos años y continúa creciendo a un ritmo acelerado desde el año 1950 (Véase figura 1). La demanda de agua dulce continúa aumentando en muchas de las economías emergentes y en los países de ingresos medios/bajos. Dicho incremento puede atribuirse al aumento de la población, al desarrollo económico y a los cambios en los patrones de consumo (Naciones Unidas, 2021).

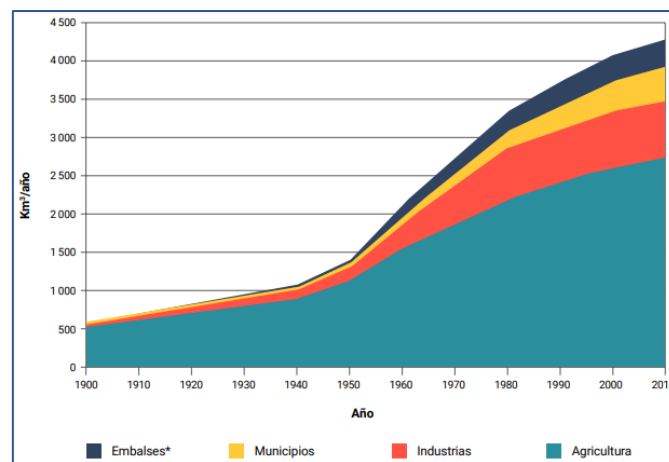


Figura 1. Aumento de la demanda de agua anual en el mundo (Naciones Unidas, 2021).

El crecimiento demográfico ha generado una demanda de agua cada vez mayor, debido a esta situación, se prevé que para el año 2030 se tendrá un déficit mundial del 40% de agua (WRG, 2012).

En México, el agua puede ser encontrada tanto de manera superficial como subterránea (Andrés et al., 2017). El mayor consumo del agua en México se debe a las actividades agrícolas (76%), seguido del abastecimiento público, en su mayoría afectado por malos hábitos de consumo (14.4%) y, en menor porcentaje, se debe al desarrollo industrial (4.9%) y a la producción de energía eléctrica (4.7%), como se observa en la figura 2 (CONAGUA, 2018).



Figura 2. Usos del agua en México (CONAGUA, 2018).

Ciclo hidrológico

La fuente del agua es el medio ambiente y toda el agua extraída por los seres humanos regresa a él, junto con cualquier impureza añadida. Las tendencias de las interacciones del medio ambiente con el agua indican la necesidad de gestionar los recursos hídricos incorporando de mejor manera el valor del medio ambiente (J. García, 2017)

Del océano a la superficie terrestre, el agua atraviesa la parte inferior de la atmósfera, teniendo así la posibilidad de equilibrarse con sus gases (Véase figura 3). La composición de la precipitación es muy variable y los contaminantes atmosféricos influyen sobre ella. La lluvia y la nieve que se generan en una atmósfera pueden ser muy ácidas. Sin embargo, el agua de lluvia es una solución

muy diluida de sales disueltas, lo que indica la eficiencia del proceso de destilación que resulta en la producción de agua potable a partir de agua de mar. Durante la precipitación el agua establece contacto con rocas, sedimentos y el suelo, así como con los habitantes, tanto animales como vegetales, de la superficie terrestre. Es ahí donde se llevan a cabo reacciones químicas que modifican aún más la composición del agua. La composición de la superficie terrestre y el grado de actividad biológica, así como su naturaleza, varían de un lugar a otro, lo cual hace que se produzcan aguas de muy diversas composiciones. El tiempo y el grado de contacto entre el agua y las rocas también influyen sobre su composición (Snoeyink, 1999).

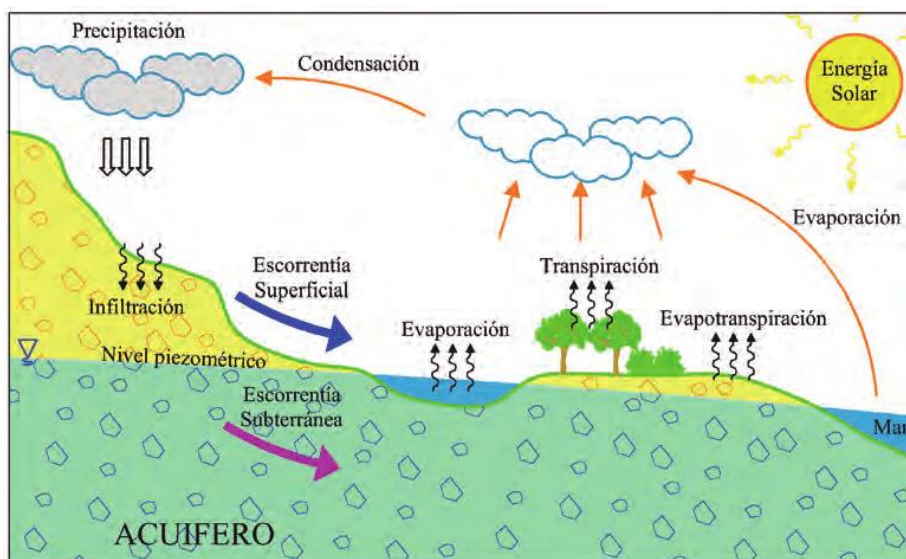


Figura 3. Esquema del ciclo hidrológico (J. Gómez & Sanz, 2013).

Agua subterránea

El agua subterránea es aquella que satura por completo los poros del subsuelo, que terminan formando y alimentando los 653 acuíferos en los que está dividido el país, distribuidos en las 13 Regiones Hidrológico-Administrativas. La importancia del agua subterránea radica en que ayuda al crecimiento socioeconómico del país que, al depositarse, puede ser utilizada en cualquier época del año. Además, cerca del 37% del agua que se utiliza proviene de este tipo de abastecimiento; es decir, 30 mil 374 millones de metros cúbicos al año. Se ha estimado que existen alrededor de 1 400 millones de kilómetros cúbicos de agua en

el planeta, de los cuales, como se aprecia en la figura 4, sólo 2.5% corresponden al agua dulce (CONAGUA, 2016).

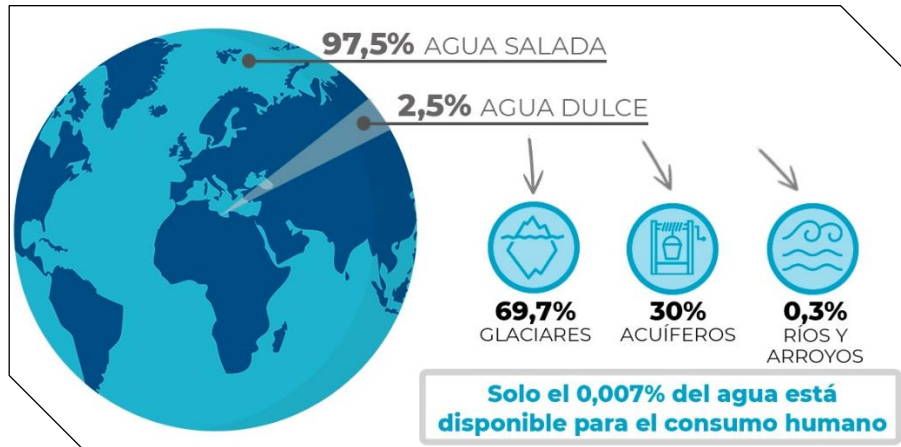


Figura 4. Contenido de agua dulce y salada en el mundo (ONU, 2019).

México cuenta con 653 acuíferos, los cuales están distribuidos en las 13 Regiones Hidrológico-Administrativas. La importancia del agua subterránea radica en que ayuda al crecimiento socioeconómico del país, debido a que puede ser utilizada en cualquier época del año. Cerca del 37% del agua que se utiliza proviene de este tipo de abastecimiento (CONAGUA, 2016).

La composición química del agua subterránea comúnmente se considera invariable, pero deben considerarse las interacciones (agua-medio), ya que a través de procesos dinámicos (espacio-temporal) se alteran las propiedades de los acuíferos; por lo tanto, una composición química concreta del agua subterránea no queda completamente definida, si no se hace referencia a un lugar y a un momento específico (Rigola, 1990).

Calidad del agua

Un problema importante relacionado con la posibilidad de utilizar el agua es su grado de contaminación. Las aguas de los cuerpos superficiales y subterráneos se contaminan por las descargas de aguas municipales e industriales, sin tratamiento previo, así como por los arrastres que provienen de las zonas que practican actividades agrícolas y pecuarias, entre otras (SEMARNAT, 2012).

La descarga de aguas residuales domésticas e industriales sin un proceso de tratamiento que elimine los contaminantes que contienen, afecta negativamente la calidad de las aguas superficiales que las reciben. La calidad del agua depende de múltiples factores, como la calidad y la cantidad de las descargas directas de agua o de residuos sólidos provenientes de las actividades domésticas, agropecuarias o industriales, así como la disposición inadecuada de residuos sólidos urbanos o peligrosos que pueden a través de los escurrimientos superficiales y lixiviados, contaminar los cuerpos de agua. Aun cuando los ecosistemas acuáticos y terrestres son capaces de procesar y diluir los contaminantes hasta cierto grado, en altas concentraciones y sin tratamiento pueden, además de causar la desaparición de la vegetación y la fauna, impedir el aprovechamiento de los recursos hídricos de los cuerpos afectados (Morales-Durán et al., 2018).

La calidad del agua se determina mediante la caracterización fisicoquímica de muestras de agua y su comparación con normas y estándares de calidad. De esta forma se puede identificar si el agua cumple los parámetros de calidad determinados, según el fin para el que se requiera (ONU, 2013). El deterioro de la calidad del agua ocurre por procesos tanto naturales como antrópicos (CNA, 2017). Para el cumplimiento de los parámetros de calidad, es necesario conocer las características de la fuente de abastecimiento, ya sea subterránea o superficial, para así identificar el tratamiento más efectivo. Las aguas subterráneas suelen ser más difíciles de contaminar que las superficiales. Pero cuando esta contaminación se produce es más difícil de eliminar, debido a que las aguas del subsuelo tienen un ritmo de renovación muy lento. Se calcula que, mientras el tiempo de permanencia medio del agua en los ríos es de días, en un acuífero es de cientos de años, lo que hace muy difícil su purificación (Echarrí, 1998).

Capilaridad

La capilaridad es un fenómeno debido a la tensión superficial, en virtud del cual un líquido asciende por tubos de pequeño diámetro o por entre láminas muy próximas (Duque, 2003). Las aguas superficiales se infiltran en el terreno por los

poros y las grietas del suelo, hasta llegar a una cierta profundidad, donde todos los huecos están llenos de agua. Esta zona se denomina zona de saturación o capa freática. Su límite superior es la superficie de saturación o superficie freática. La zona comprendida entre la superficie de saturación y la superficie del suelo, llamada zona de aireación está recorrida por el agua que se infiltra hacia abajo y el vapor de agua que tiende a escapar hacia la atmósfera (Véase figura 5). El agua de la zona de saturación asciende, por capilaridad, por los pequeños intersticios del terreno, formando una franja capilar de mayor o menor espesor. Según la naturaleza del terreno; ésta puede no existir o elevarse uno, dos o hasta tres metros por encima de la superficie de saturación (Fuentes, 1993). La Franja capilar es la zona en el suelo justo por encima del nivel freático que se mantiene saturada o casi saturada (Michigan State University, 1991).

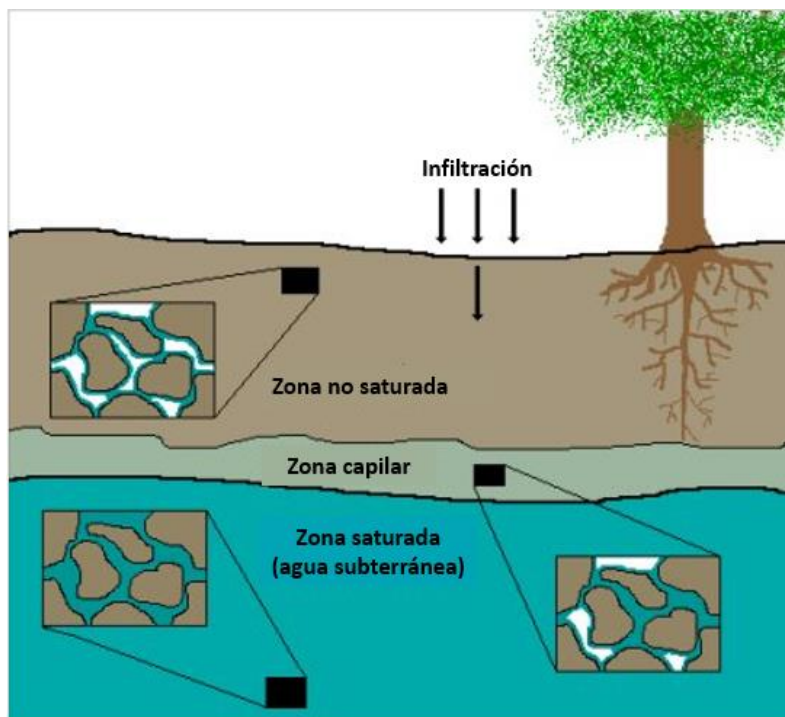


Figura 5. Capilaridad. Adaptada de (Michigan State University, 1991).

Dependiendo de los suelos existentes en la zona, se puede tener un ascenso capilar desde 12 hasta 3050 cm, como se puede observar en la tabla 1 (Custodio & LLamas, 1983).

Tabla 1. Ascensos capilares máximos en diferentes terrenos y suelos (Custodio & LLamas, 1983).

Material	Diámetro de partículas (mm)	Ascenso capilar (cm)	Observaciones
Arcilla	0.0005	3060 (2)	
Arcilla	0.005 a 0.001	610 a 3050 (1)	200 a 400 cm (5)
Suelo arcilloso		200 a 400 (4)	
Limo	0.05 a 0.005	61 a 610 (1)	70 a 150 cm (5)
Suelo arenoso		100 a 150 (4)	
Suelo podsólico		35 a 40 (4)	
Arena fina	0.025 a 0.05	12 a 61 (1)	35 a 70 cm (5)
Arena media		12 a 35 (5)	
Arena gruesa	2.00 a 0.025	12 a 15 (1)	2 a 5 cm (5)
Calizas y areniscas fracturadas		120 a 450 (3)	

(1) Tschobotarioff (1951) en Schoeller (1962), pág. 60.

(2) Terzaghi (1925) en Schoeller (1962), pág. 60.

(3) Dienert (1940 y 1941) en Schoeller (1962), pág. 60.

(4) Polubarinova-Kochina (1952), pág. 19.

(5) Silin-Bekchurin (1958) en Harr (1962), pág. 10.

*El fenómeno de capilaridad será de suma importancia para analizar el contacto del agua subterránea con las edificaciones universitarias.

Situación actual de la población universitaria

Hasta el año 2021, según los datos más recientes, la UANL atiende en su totalidad a 215,035 estudiantes en los diferentes niveles que integran su oferta educativa en sus diferentes campus (Véase figura 6). Del año 2015 a la fecha, la población escolar se ha incrementado en un 18.7% (Guzmán, 2021). El aumento poblacional se enfoca en zonas urbanas, lo que trae consigo el aumento de la demanda de agua, así como el aumento de las actividades industriales y la contaminación, lo cual es el caso de la ciudad de Monterrey y de su área Metropolitana (Pérez, 2019).

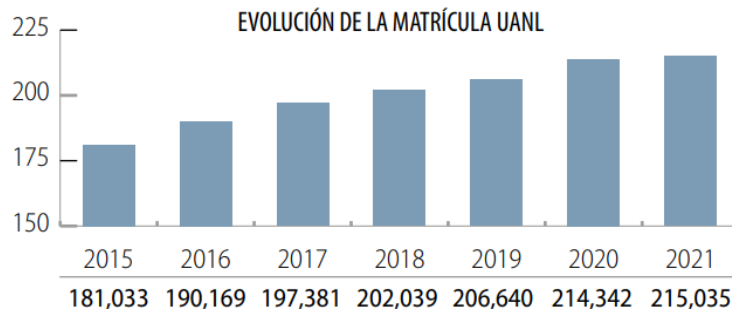


Figura 6. Evolución de matrícula UANL (Guzmán, 2021).

Historia de las edificaciones del campus de CU de la UANL

Durante el gobierno del licenciado Raúl Rangel Frías se construyeron las distintas facultades del Campus de CU de la UANL. Como primera etapa se construyeron los edificios de la Facultad de Derecho, así como de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (1958); posteriormente, en el año 1960 se construyeron simultáneamente las Facultades de Ingeniería Civil, Comercio y Administración; la alberca olímpica y la Torre de la Rectoría fueron construidas en el año (1961); la Facultad de Arquitectura se construyó en (1962), en el año posterior se edificó la Facultad de Filosofía y Letras (1963); y finalmente se cimentó el Estadio Universitario en el año de 1967. La construcción de estas edificaciones implicó un monumental esfuerzo de las autoridades universitarias con el apoyo de estudiantes, profesores y de la sociedad civil (Hérrnandez & Martínez, 2010).

Años más tarde, se construyó el Instituto de Ingeniería Civil de la UANL, fue en el año de 1971 que el ingeniero Raymundo Rivera Villarreal tuvo la idea de concentrar los laboratorios de la FIC en un mismo lugar, dicha obra concluyó en el año de 1984 (Facultad de Ingeniería Civil, 2020).

El desplante de las zapatas de las edificaciones Torre de la Rectoría y Estadio Universitario fue realizado de acuerdo con el aprovechamiento del terreno. Las pendientes naturales del terreno permitieron a la cancha del Estadio Universitario quedar por debajo del nivel de la calle, disminuyendo tanto la estructura de concreto como el costo total de construcción del estadio. A medida que se realizaba la excavación, se depositó el material en montones, con el aprovechamiento máximo de la tierra (Véase figura 7). Debido a el aprovechamiento de las tierras, el estadio universitario quedó desplantado sobre un terraplén a una altura de 5.50 metros sobre el terreno natural (Véase figura 8), a diferencia de la Torre de la Rectoría que esta desplantada sobre el terreno natural directamente (Véase figura 9) (Cervantes, 1960).

El instituto de Ingeniería Civil se realizó desplantando las zapatas sobre el terreno natural, como se observa en la figura 10 (Garza, 1975).



Figura 7. Fotografía de construcción del Estadio Universitario (Cervantes, 1960).

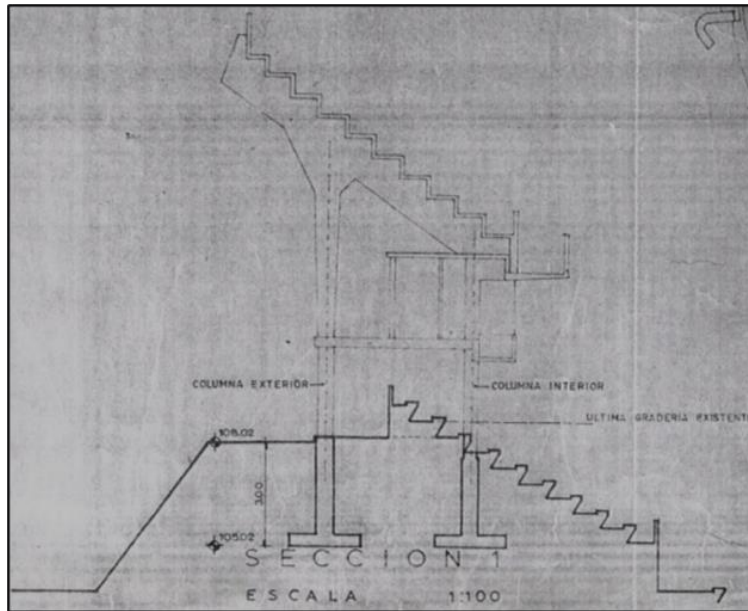


Figura 8. Cimentaciones del Estadio Universitario escala 1:100 (Cervantes, 1960).

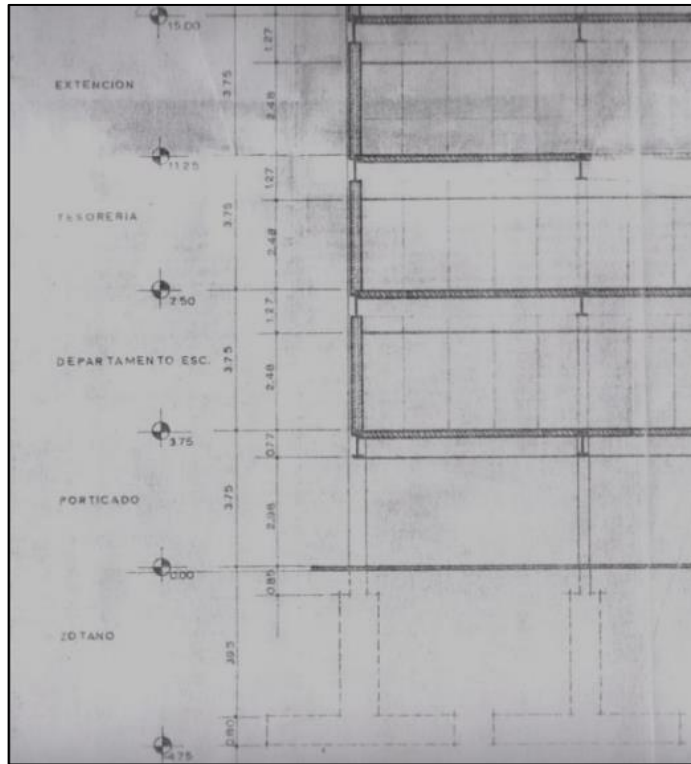


Figura 9. Cimentaciones edificio de la Rectoría escala 1:100 (Cervantes, 1960).

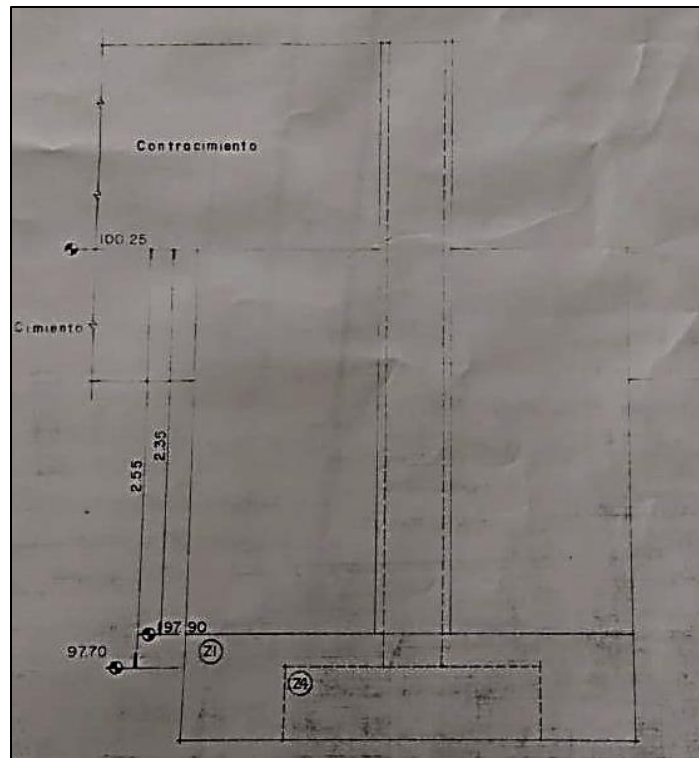


Figura 10. Cimentaciones del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL (Garza, 1975).

El Estadio Universitario tiene una cimentación de zapatas aisladas, con una profundidad de desplante de 3 m, sobre un terraplén de 8.05 m de espesor, el cual está conformado por los mismos materiales presentes en el terreno natural (Cervantes, 1960). La distancia entre el desplante de la cimentación hasta el nivel freático es de 18.98 m, como se observa en la figura 11 (De León, 2019; Pérez, 2019).

La Torre de la Rectoría tiene una cimentación desplantada a 4.75 m. De ellos se derivan 3 m sobre un terraplén compuesto por los mismos materiales presentes en el terreno natural, al igual que el estadio universitario (Cervantes, 1960). La distancia desde el desplante de la cimentación hasta el nivel freático es de 10.45 m, como se observa en la figura 12 (De León, 2019; Pérez, 2019).

Las cimentaciones de ambas estructuras fueron realizadas con columnas de acero y zapatas aisladas de concreto (elaboradas con un Cemento Portland Ordinario (CPO) diseñado con resistencia a compresión de 210 kg/cm^2) (Cervantes, 1960).

El Instituto de Ingeniería Civil tiene una cimentación desplantada a 3.15 m de profundidad como se observa en la figura 13 (Garza, 1975).

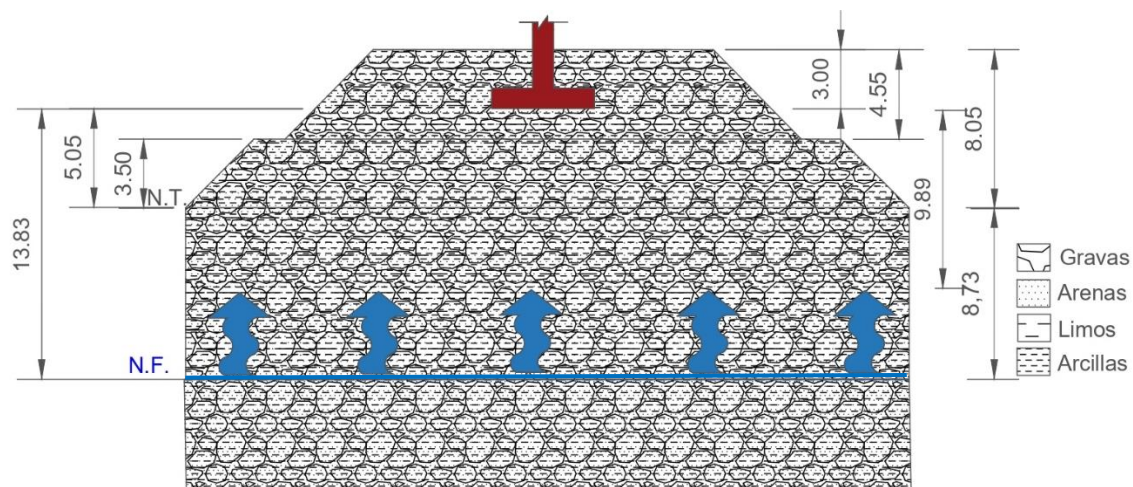


Figura 11. Representación de cimentación del Estadio Universitario (elaboración propia, 2021).

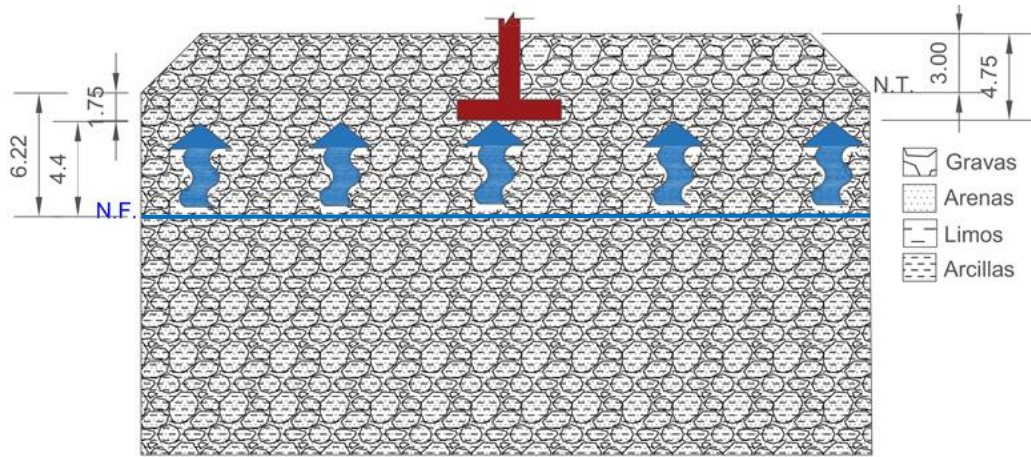


Figura 12. Representación de cimentación de la Torre de la Rectoría (elaboración propia, 2021).

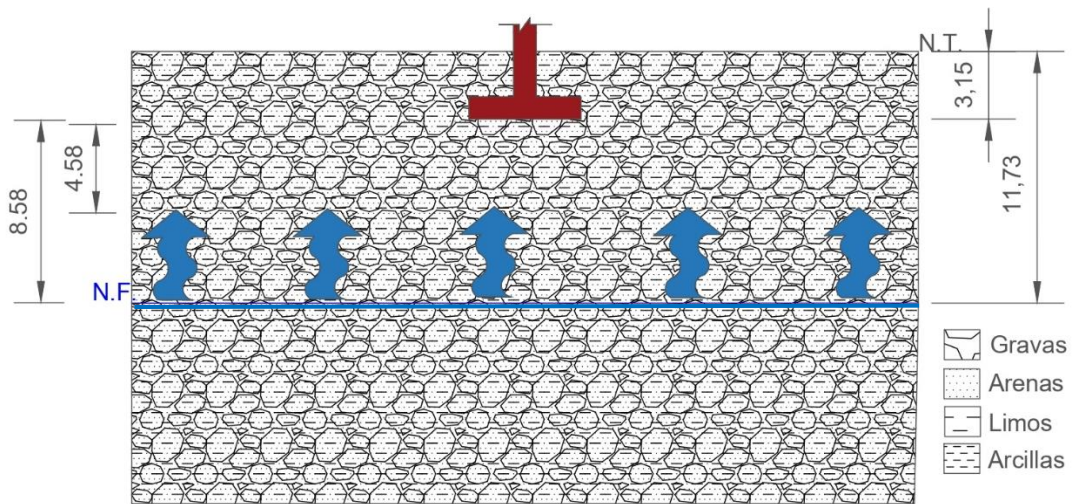


Figura 13. Representación de cimentaciones del Instituto de Ingeniería Civil (elaboración propia, 2021).

1.2. ANTECEDENTES

En el año 1986, Murillo realizó el estudio hidrogeoquímico del área metropolitana de Monterrey. Se reportó que el acuífero de Monterrey y el área metropolitana cuenta con 3 diferentes familias de agua: el Agua Mixta-Cálcica que cubre casi la totalidad del área estudiada; el agua Bicarbonatada-Cálcica, que se localiza en las zonas sureste, poniente y noroeste de la zona estudiada; el agua Sulfatada-Cálcica, que se localiza al norte y noroeste de la ciudad, donde se encuentran los valores más altos de sólidos totales y conductividad, indicando que hacia esa zona se dirige el agua subterránea.

En el año 1999, Hernández realizó la caracterización del acuífero de Ciudad Universitaria de la UANL. Se concluyó que el acuífero no se ve favorecido por la lluvia, puesto que en dicha zona la precipitación se presenta muy concentrada durante un pequeño lapso. Esto, aunado con la cantidad de área pavimentada y construida, hacen que los escurrimientos y la evapotranspiración sean mayores que la recarga del acuífero. La zona de estudio se localiza sobre la formación Méndez, compuesta por lutitas intemperizadas y fracturadas.

En el año 2007, Rodríguez mencionó en su investigación, que la geología de la Cd. de Monterrey se encuentra compuesta por capas de limos o arcillas, gravas parcialmente cementadas y el basamento geológico definido por lutitas de la Formación Méndez.

En 2015, Silva et al., realizaron el estudio de las microcuencas hidrológicas urbanas y los perfiles hidroestratigráficos en la zona del campus de Ciudad Universitaria de la UANL. Los resultados mostraron que la superficie del suelo existente en el Campus de CU de la UANL tiene un dominio de arcilla combinada con caliche, gravas, arenas y limos. En una mayor profundidad se encuentra un estrato intermedio, formado por paquetes de gravas y boleos medianamente cementados. Finalmente, a grandes profundidades se encuentra la Formación Méndez. Se determinó que el agua subterránea fluye con dirección suroeste a noreste.

En 2016, Sisto et al., publicaron un artículo en la revista *Physics and Chemistry of the Earth*, donde mencionaron que el riesgo de una crisis de agua en

el Área Metropolitana de Monterrey (AMM) es sustancial y probablemente aumentará debido al cambio climático. Esto establece una necesidad de un paquete integral de medidas de adaptación para mitigar las consecuencias de una crisis del agua.

En 2017, Mora et al., analizaron la hidrogeoquímica del agua subterránea del AMM. Se determinó la presencia de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y NO_3^- ; sin embargo, se concluyó que no se han presentado cambios significativos en la calidad del agua subterránea suministrada al AMM entre el año 2006 y el año 2012.

También en 2017, García realizó el análisis hidrogeológico e hidrogeoquímico del campus CU de la UANL. Se concluyó que debido a que el campus se encuentra en una zona industrial y urbana, la calidad del agua subterránea se ve afectada por bacterias coliformes, sulfatos, cloruros y metales (Véase tabla 2).

Tabla 2. Elementos que sobrepasan los LMP en mg/L. Adaptado de (García, 2017).

ANÁLISIS	PCU-1	PCU-3	PCU-4	PCU-5	PCU-6	PCU-7	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES					
							NOM-001-ECOL		NOM-127-SSAI-1994	EPA-815-F-00-007	REAL DECRETO 140/2003	OMS, 2006
							RIEGO	URBANO	POTABLE			
Cl^-	815.3	730.3	188.0	124.8	182.6	175.5	N.E	N.E	250.0	N.E	250.0	N.E
SO_4^{2-}	462.5	462.5	143.7	120.0	144.0	90.0	N.E	N.E	400.0	N.E	250.0	400.0
Al^{3+}	0.0050	0.0360	0.0060	0.1800	0.0103	0.0910	N.E	N.E	0.2000	N.E	0.2000	N.E
Fe^{3+}	0.1000	0.1300	0.0200	0.8500	0.2900	0.2900	N.E	N.E	0.3000	N.E	0.2000	N.E
Mn^{2+}	0.0032	0.0037	0.0007	0.0625	0.0236	0.0177	N.E	N.E	0.1500	N.E	0.0500	0.400

N.E = No específica; Concentraciones que sobrepasan los LMP.

En 2019, De León realizó la hidrogeología del campus de CU de la UANL y determinó que en condiciones de huracanes, añadiendo la capilaridad de 4 m, existe un contacto temporal de las cimentaciones de la Torre de la Rectoría con el agua subterránea.

En 2019, Pérez realizó estudios hidrogeológicos e hidrogeoquímicos en el acuífero del campus de CU de la UANL. En la investigación se reportaron altas concentraciones de metales (Véase tabla 3). Se concluyó que los contaminantes encontrados en el agua subterránea generan daños a las cimentaciones en forma

de corrosión del acero y degradación del concreto según la normatividad del ACI 318.

Tabla 3. Metales cercanos a los LMP en mg/L. Adaptado de (Pérez, 2019).

ANÁLISIS	PCU-1	PCU-3	PCU-4	PCU-5	PCU-6	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES																	
						NOM-001-ECOL-1996		NOM-127-SSA1-199		EPA 815-F-00-007		REAL DECRETO 140/2003		OMS, 2006		NCh409/1. Of2005		FAO, 1985		NOM-250-SSA1-2014		OMS, 1995	
						RIEGO	URBANO	AGUA POTABLE				RIEGO		AGUA POTABLE									
Cd ²⁺	0.00033	0.00003	0.00024	< 0.00002	0.00003	0.2	0.1	0.005	0.005	0.005	0.003	0.01	0.01	0.003	0.003								
Ba ²⁺	0.0321	0.0422	0.0489	0.111	0.0623	N.E	N.E	0.7	2	N.E	0.7	4	N.E	0.7	N.E								
Fe ³⁺	< .02	< .02	< .02	< .02	< .02	N.E	N.E	0.3	N.E	0.2	N.E	5	5	0.03	N.E								

N.E = No específica; Concentraciones cercanas a los LMP.

1.3. JUSTIFICACIÓN DE ESTE ESTUDIO

Según estudios anteriores, el acuífero del campus de la CU de la UANL se encuentra contaminado por los iones Fe^{3+} , Al^{3+} , Mn^{2+} , Cl^- y SO_4^{2-} . Además, el agua subterránea tiene contacto con las cimentaciones de la Torre de la Rectoría en épocas de lluvias. Dichas condiciones generan corrosión en el acero y degradación en el concreto de las cimentaciones, por lo que es necesario tener un seguimiento de estudios hidrogeológicos e hidrogeoquímicos del agua subterránea, para conocer su evolución, con la finalidad de determinar en qué grado se han afectado y afectarán las cimentaciones de Torre de la Rectoría de la UANL, el Instituto de Ingeniería Civil y el Estadio Universitario.

1.4. HIPÓTESIS

El Campus de la CU de la UANL se ve afectado tanto por contaminación industrial como por la contaminación antropogénica. Se presume que existan altos niveles de contaminación en el agua subterránea. Dicha contaminación será evaluada a través de estudios hidrogeoquímicos e hidrogeológicos, con la finalidad de conocer la evolución de las propiedades fisicoquímicas y la hidrodinámica del agua subterránea y pronosticar el posible grado de afectación en las cimentaciones de la Torre de la Rectoría de la UANL, del Estadio Universitario y del Instituto de Ingeniería Civil.

1.5. OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar la evolución de los parámetros fisicoquímicos y de la hidrodinámica del agua subterránea en los últimos 5 años, así como pronosticar el impacto de esa agua subterránea hacia las cimentaciones de la Torre de la Rectoría, del Estadio Universitario y del Instituto de Ingeniería Civil, con el paso del tiempo.

Objetivos específicos

1. Determinar la geología del área de estudio, para identificar los materiales geológicos aflorantes en el subsuelo.
2. Determinar los niveles freáticos de los pozos de abastecimiento de agua dentro de la zona de estudio, en diferentes épocas del año (extraordinaria, ordinaria y sequía), para obtener la serie de cartas piezométricas.
3. Realizar el muestreo fisicoquímico y de metales de los aprovechamientos hidráulicos, en la CU.
4. Determinar la evolución de los parámetros fisicoquímicos del agua subterránea mediante gráficos y mapas temáticos de distribución, para compararlos con la normatividad ambiental correspondiente.
5. Estimar el grado de afectación del agua subterránea hacia las cimentaciones de la Torre de la Rectoría, del Estadio Universitario y del Instituto de Ingeniería Civil, de acuerdo con las Normas de Construcción pertinentes.

CAPÍTULO 2 (MARCO TEÓRICO)

2.1. FISIOGRAFÍA

Los municipios de Monterrey y de San Nicolás de los Garza (municipios donde se ubica el área de estudio) se localizan en las provincias fisiográficas Sierra Madre Oriental y la Llanura Costera del Golfo Norte. La Llanura Costera del Golfo Norte está formada por la sierra de las Mitras, que presenta lomeríos suaves con bajadas y llanuras de extensión considerable, representando un 15.07% del Estado; mientras que la Sierra Madre Oriental cruza el Estado de noroeste a sureste, siendo separada por profundos valles y cañones. Además, en ella se encuentran extensas llanuras desérticas. La provincia antes mencionada corresponde al 49.85 % del Estado (SEDAGRO, 2000).

2.2. HIDROLOGÍA

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 (Martínez, 2018).

El área de estudio se encuentra dentro de la Región Hidrológica 24, (RH 24), río Bravo, en la subregión del río Bravo, en la cuenca del río San Juan (Véanse figuras 14 y 15), donde la zona es drenada al norte por el río Pesquería, en su parte media por los arroyos del Topo Chico y la Talaverna y al sur por el río Santa Catarina (CONAGUA, 2015).



Figura 14. Cuenca Río Bravo (CONAGUA, 2015).



Figura 15. Subcuenca del Río San Juan (CONAGUA, 2015).

La red de drenaje natural del campus CU-UANL presenta una tendencia a fluir de SW a NE y forma parte de la cuenca del arroyo del Topo Chico. El arroyo del Topo Chico está localizado en la región circundante al cerro del Topo (Véase figura 16). Actualmente este arroyo está canalizado desde la avenida Bernardo Reyes, hasta su desembocadura en el río Pesquería (Pérez, 2019).



Figura 16. Arroyo del Topo Chico (Pérez, 2019).

Climatología

En Monterrey, los veranos son largos, cálidos y bochornosos; los inviernos son cortos, frescos y secos y está parcialmente nublado durante todo el año. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 10 a 36 °C y rara vez baja a menos de 4 °C o sube a más de 38 °C (Weather Spark, 2021).

Precipitación

Un factor muy importante para las m y la toma de muestras de agua subterránea es la precipitación, debido a que se deben tomar mediciones del nivel piezométrico en diferentes épocas del año (ordinario, sequía y extraordinario), además, las campañas de muestro deben realizarse durante periodos de sequía o de ausencia de lluvias, para evitar que las aguas del acuífero presenten turbiedad al momento del muestreo y se alteren las concentraciones de los contaminantes en el agua (Pérez, 2019).

En Monterrey los meses con mayor precipitación son septiembre, agosto y octubre. La cantidad anual de precipitación en Monterrey es de 589 mm. El mes más caliente del año es Julio. Enero es generalmente el mes más frío en Monterrey (Véase figura 17) (HikersBay, 2018).

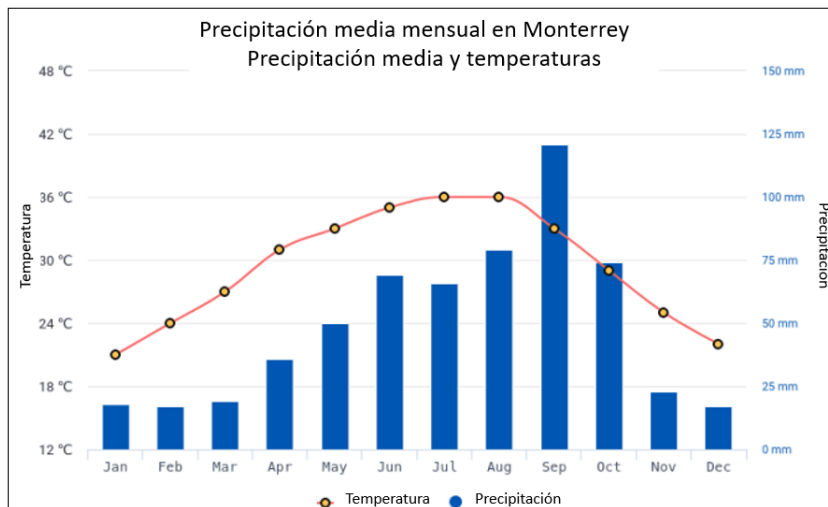


Figura 17. Temperatura y lluvia media en Monterrey. Adaptada de (HikersBay, 2018).

A continuación, se presentan los registros de lluvias desde el año 2016 hasta el año 2021 en el estado de Nuevo León (SMN, 2021). Así como, las fechas de eventos de investigación del agua subterránea de la zona de estudio (Véase figura 18).

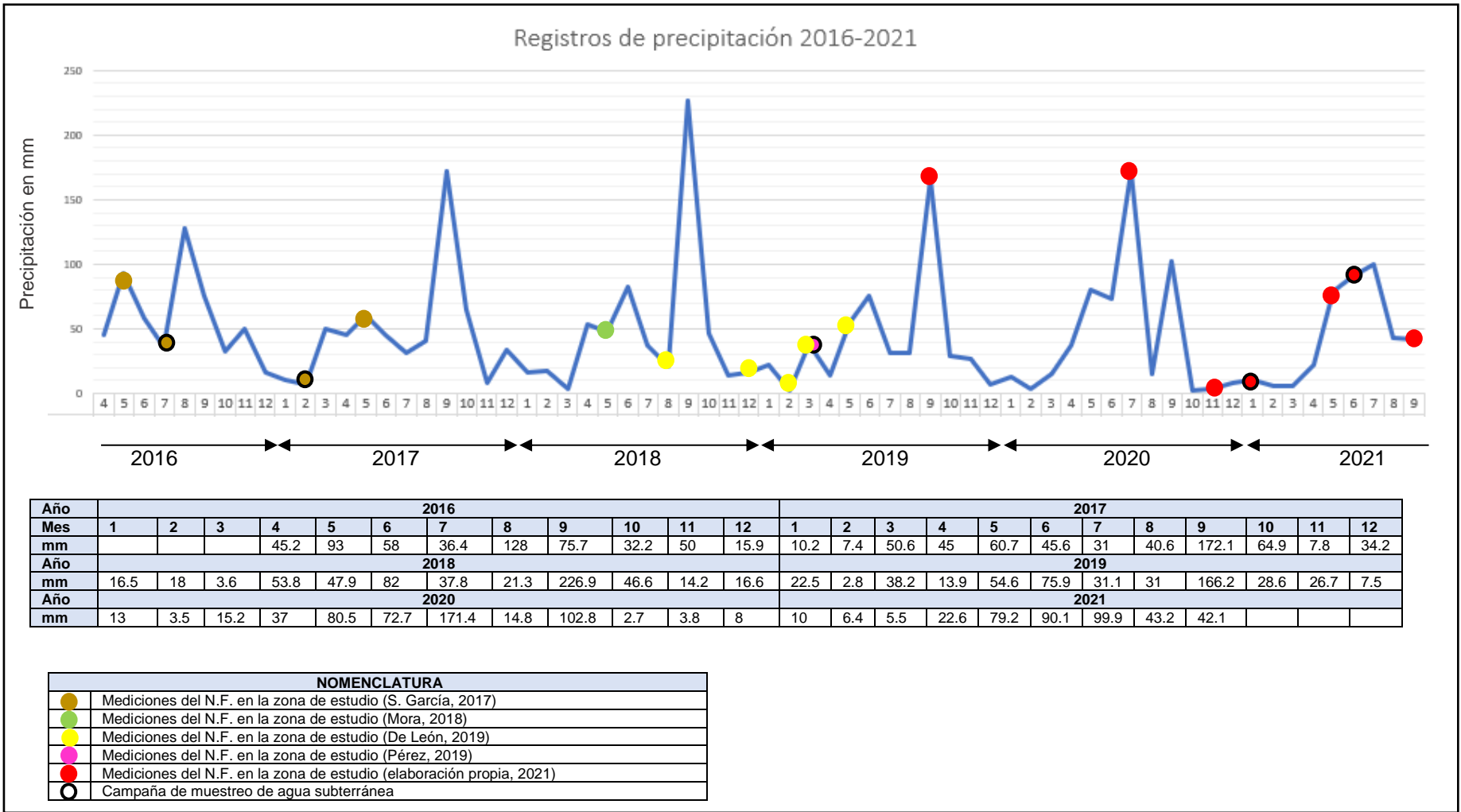


Figura 18. Registro de lluvias desde el año 2016 hasta el año 2021 (elaboración propia, 2021).

2.3. SEQUÍA

Tipos de sequía

Ortega 2021, explica los tipos de sequías, tomando en cuenta sus características que a continuación se explican:

- **Sequía meteorológica:** se define como una condición anormal y periódica del clima que se presenta en cada región particular de la Tierra. Se define por una ausencia prolongada de precipitaciones, en relación con la precipitación normal, causando desbalance hidrológico.
- **Sequía agrícola:** se define en términos de disponibilidad de agua en los suelos para el sostenimiento de áreas de cultivo. Es ocasionada por un déficit marcado y permanente de lluvia que reduce a la deficiencia de humedad en el suelo. Lo cual, obstaculiza el desarrollo de un determinado cultivo en cualquier fase de crecimiento.

Sequía hidrológica: es una deficiencia en el caudal o volumen de aguas superficiales o subterráneas, con respecto a los niveles que se consideran normales. Hay un desfase considerable entre el cambio de comportamiento de las precipitaciones y el momento en el que el déficit hídrico se hace presente en las corrientes superficiales. Esta sequía es de largo plazo, pudiendo durar desde meses hasta años.

- **Sequía socio-económica:** esta sequía incorpora las sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas, cuando la disponibilidad del agua disminuye hasta el punto en que la población comienza a presentar daños debido a la escasez de agua.

En esta investigación se hará referencia a la sequía meteorológica ya que fue debido a registros precipitación que se determinó la época más favorecedora a la toma de muestras.

2.4. GEOLOGÍA

La geología del estado de Nuevo León es caracterizada por presentar predominantemente rocas sedimentarias mesozoicas plegadas, que se encuentran sobre un basamento paleozoico y precámbrico. El rasgo fisiográfico más significativo en este caso, lo constituye la flexión que sufre la Sierra Madre Oriental (SMO) a la altura de Monterrey. La estratigrafía de la SMO es muy variada (figura 17), presenta rocas siliciclásticas, carbonatadas y sulfatadas que van de edades desde el Triásico superior hasta el Cuaternario (Michalzik, 1988).

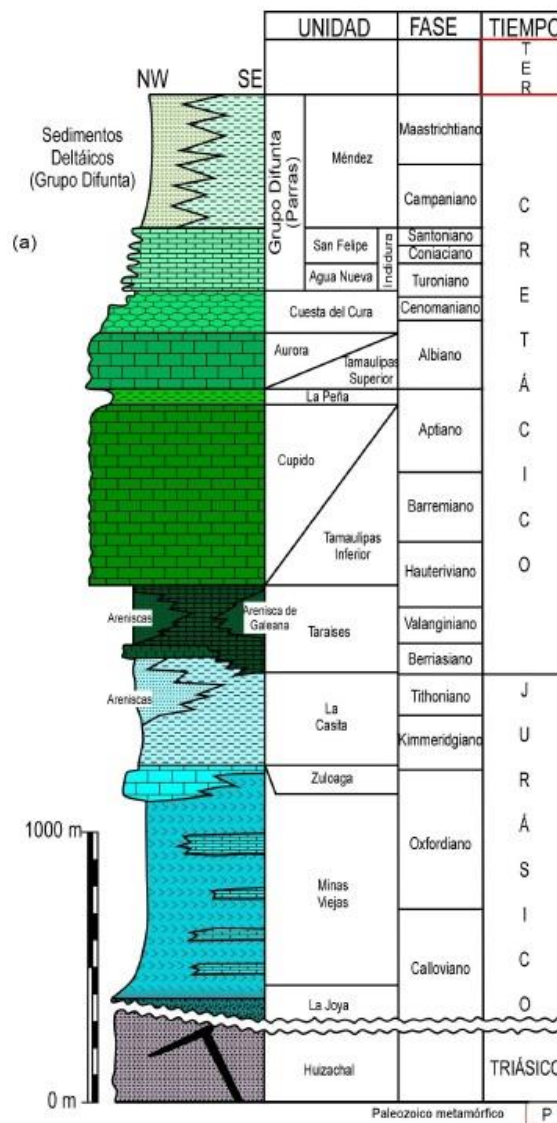


Figura 19. Perfil estratigráfico de la zona de estudio (Michalzik, 1988).

El material que predomina en el AMM son los sedimentos fluviales con escasos afloramientos de lutitas de la formación Méndez del Cretácico Superior. La formación Méndez está compuesta de lutitas y margas de color marrón claro-verdoso y gris con estratificación laminar; además, presenta un alto grado de fracturamiento. Sobre esta formación afloran capas delgadas de depósitos sedimentarios fluviales del cuaternario, compuestos por gravas, limos, arcillas y arenas (Alva et al., 1998).

Geología en la zona de estudio

La litología está representada por un espesor de suelo de entre 21 y 25 m. de espesor, donde los materiales se presentan como sigue: sobre la roca base fracturada de tipo lutítico de la formación Méndez, descansan lentes de un material predominantemente arcilloso, con espesores entre 0 y 8 m. Encima se encuentran lentejones de gravas y materiales calizos muy lixiviados relativamente fáciles de disgregar. La matriz de naturaleza limo-arenosa con algo de arcilla, es pobre, y junto con el cementante (caliche) se distribuye rellenando espacios y poros entre las gravas. Concediendo, según la cantidad de cementante, diferentes grados de cementación. El espesor de estos lentejones oscila entre 2.5 y 22 m (Hernández, 1999).

Pérez 2019, realizó la estratigrafía de la zona de estudio, a una profundidad aproximada de 5 m, donde encontró que el campus de CU se localiza sobre un depósito compuesto por gravas parcialmente cementadas, arenas, limos y arcillas (Véanse figuras 20 y 21). Además, logró capturar y reportar la presencia de oxidación en los estratos del perfil estratigráfico, lo cual no es una propiedad geológica natural de la zona de estudio y nos indica la exposición de la zona a una fuente de contaminación por metales (Véase figura 22).

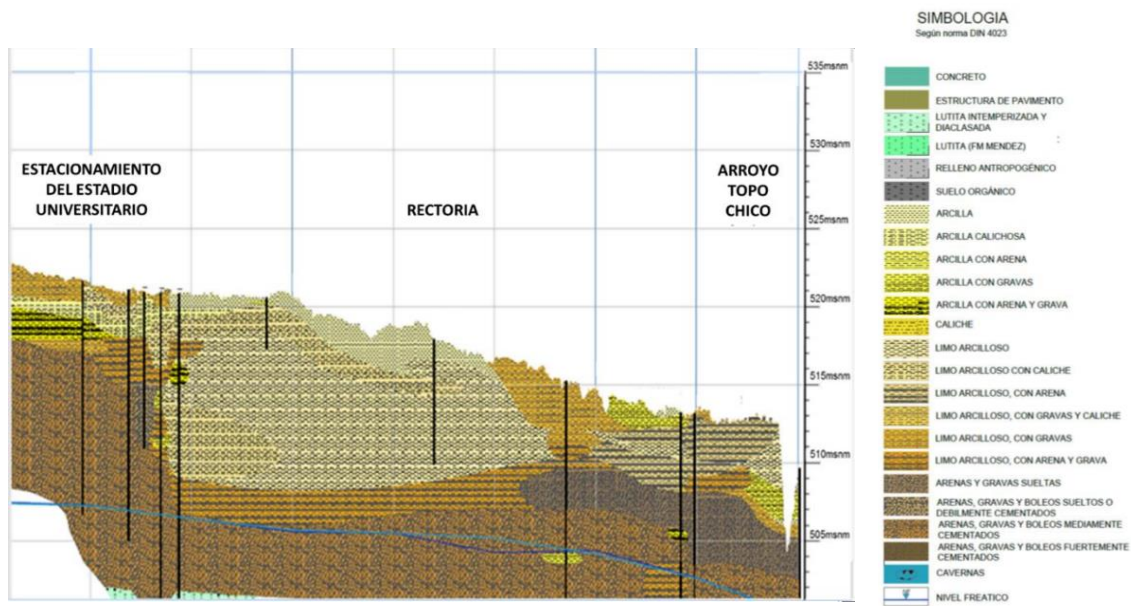


Figura 20. Perfil estratigráfico dentro del área de estudio, (Silva et al, 2015)



Figura 21. Sección del perfil estratigráfico (Pérez, 2019).



Figura 22. Presencia de oxidación en el acuífero (Pérez, 2019).

2.5. HIDROGEOLOGÍA

La Hidrogeología es la rama de la Geología que estudia las condiciones hidrodinámicas del agua subterránea (Werner, 1996).

La Hidrogeología es considerada la parte de la Hidrología que concierne a la circulación, almacenamiento y distribución de las aguas en la zona saturada de las formaciones geológicas, considerando sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico y sus reacciones a la acción humana. Es un área de la ciencia que aumenta el conocimiento del Universo a través de observaciones, análisis y la formulación de leyes; cuya validez puede ser comprobada estadísticamente. Además, es un instrumento que sirve para controlar y utilizar el agua y, como tal, establece un elemento fundamental de la tecnología de recursos naturales. La comprensión de las formaciones geológicas que constituyen los embalses subterráneos es obtenida a través de mapas y perfiles geológicos a escala adecuada, según la finalidad del estudio. Se puede decir que las ramas más utilizadas en los estudios hidrogeológicos son la estratigrafía y la tectónica (Custodio & LLamas, 1983).

Interacción entre el agua subterránea y el medio geológico

Cuando los lentes de gravas y arenas no están cubiertos con arcillas y limos carecen de plasticidad y de tenacidad, lo que hace que su capacidad de retener agua sea escasa y debido a las grandes separaciones entre sus partículas el paso del agua gravitacional es rápido, facilitando así el drenaje y el movimiento del aire. Las partículas de arcilla normalmente son laminares, y si se humedecen son muy plásticas. Cuando la arcilla es expuesta a una cantidad adecuada de agua, ésta se expande y se vuelve pegajosa. Por su parte, las partículas de limo tienden a ser irregulares y raras veces lisas o pulidas, en su mayoría son partículas microscópicas, siendo el cuarzo el mineral dominante. El limo posee plasticidad, cohesión y adsorción debido a una película de arcilla que recubre las partículas. (Rucks et al., 2004)

En las aguas subterráneas, los metales se comportan en función de la composición del acuífero, la composición de la materia suspendida y la composición

química del agua. Por tanto, los acuíferos con mayores niveles de metales adsorbidos serán los conformados por arenas finas y limos (McCullough et al., 1999)

La química del agua controla la absorción/desorción de los metales hacia el acuífero y desde el acuífero. Mediante el proceso de adsorción, el acuífero elimina el metal del agua y lo almacena, mientras que mediante el proceso de desorción devuelve los metales al agua, promoviendo su movilización (López et al., 2010).

Acuíferos y su clasificación

Según (Werner, 1996), los acuíferos se clasifican en 3 tipos según su litología (Véase figura 23) a continuación, se describe cada tipo de acuífero:

- **Acuífero de poros:** en su mayor parte se trata de sedimentos sueltos, como las gravas y las arenas.
- **Acuífero de grietas:** rocas consolidadas como areniscas, calizas no carstificadas, basaltos, granitos u otras rocas extrusivas e intrusivas.
- **Acuíferos kársticos:** rocas carstificadas, como las calizas, las dolomías, el yeso, entre otros.

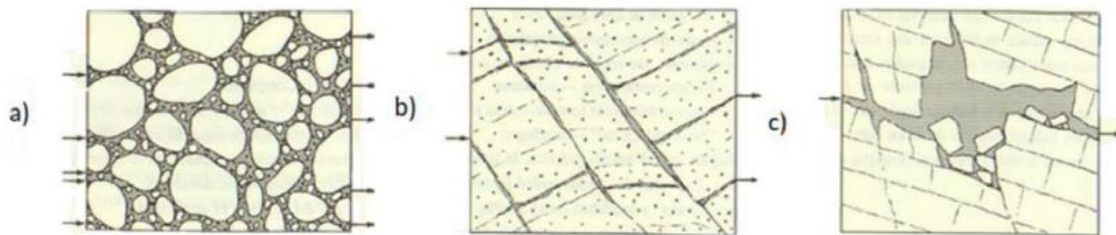


Figura 23. Tipos litológicos de acuíferos (Werner, 1996).

En la curvatura de Monterrey se localiza la zona de la Huasteca, que representa la subprovincia geológica más importante en la SMO, y es la zona de recarga más potente en el sistema hidrogeológico del AMM. Esta área se compone de acuíferos de gravas y kársticos con profundidades del agua subterránea de hasta 1,200 metros. De dicha formación geológica se extrae la mayor parte del agua que se consume en Monterrey y su zona conurbada (2000 l/s). La zona de descarga se encuentra en el AMM, constituida por el acuífero de poros donde se extraen 250 l/s (Madero et al., 2017).

De León y Pérez 2019, reportaron que el acuífero de la zona de estudio pertenece a la clasificación litológica de acuífero de poros.

2.6. HIDROGEOQUÍMICA

Determinar las propiedades fisicoquímicas del agua, es de suma importancia para los especialistas relacionados con el vital líquido. La fase inicial de cualquier trabajo hidrogeoquímico comprende el estudio bibliográfico, así como, las visitas de reconocimiento del área en estudio. En esta fase también se toman muestras, que posteriormente se analizan con fines de orientación (Fagundo, 1996).

La composición química de las aguas subterráneas es definida por diversos factores como la composición de la precipitación, la mineralogía de las rocas, el clima y la topografía (Güler et al., 2002)

Según Werner 1996, existen 7 procesos químicos principales en los sistemas de flujo de agua subterránea:

- 1. Disolución de sustancias sólidas y de gases:** este es considerado el proceso más importante de la hidrogeoquímica, pues la cantidad de materia disuelta por proceso naturales depende de la temperatura del agua, la solubilidad de los minerales, el tiempo del contacto entre agua y roca, la superficie del contacto, la concentración de sustancias ya disueltas, el pH y el potencial rédox.
- 2. Conductividad eléctrica:** ésta es prácticamente proporcional al total de sólidos disueltos. La concentración de sustancias disueltas en las aguas subterráneas comúnmente es baja.
- 3. Disolución de gases:** la solubilidad de los gases aumenta con temperaturas descendentes. Los gases más importantes en las aguas subterráneas son el Oxígeno y dióxido de Carbono.
- 4. Oxidación y reducción:** la oxidación en las aguas subterráneas sucede debido al Oxígeno excedente. Las condiciones de reducción suceden por ausencia de Oxígeno o por sustancias orgánicas exuberantes.

5. **Intercambio catiónico:** las superficies de los minerales poseen pequeñas cargas eléctricas que son capaces de absorber los dipolos del agua, así como a los cationes.
6. **pH y sus cambios,** el agua pura, a 22°C, tiene un pH de 7.0. La medición del pH en campo no tiene tanta importancia como la medición de la conductividad eléctrica.
7. **Disolución de carbonato (proceso de carstificación).** En el agua pura la solubilidad de carbonato ocurre de forma sumamente baja, mientras que con la presencia de dióxido de Carbono la solubilidad del carbonato se aumenta considerablemente.

2.7. ATAQUE QUÍMICO A LAS CIMENTACIONES POR LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La durabilidad del concreto puede definirse como la capacidad del concreto para resistir las influencias ambientales, el ataque químico y la abrasión mientras conserva sus propiedades. Los distintos tipos de concreto requieren diferentes resistencias, según la exposición al medio ambiente y las propiedades deseadas (Kosmatka, 2004).

El (ACI 201, 2001), menciona los distintos ataques químicos que dañan directamente las propiedades del concreto:

Ataque químico por sulfatos provenientes de fuentes externas al concreto. El sulfato de Sodio (Na_2SO_4), ion Potasio (K^+), ion Ca^{2+} o ion Magnesio (Mg^{2+}) que ocurren en la naturaleza, pueden atacar al concreto endurecido. Algunas veces se encuentran en el suelo y otras disueltos en el agua adyacente a las estructuras de concreto. Las dos consecuencias del ataque por sulfatos sobre los componentes del concreto, mejor conocidas son: la formación de etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$) \rightarrow ($6\text{Ca}^{2+} + 2\text{Al}^{3+} + 3\text{SO}_4^{2-} + 12\text{OH}^- + 26\text{H}_2\text{O}$) que puede generar un aumento del volumen sólido, provocando expansión y fisuración; y la formación de yeso ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que puede provocar ablandamiento y pérdida de resistencia del concreto.

Ataque físico por sales. Es el deterioro debido a la acción física de las sales del agua subterránea con contenidos de Na_2SO_4 , carbonato de Sodio (Na_2CO_3) y cloruro de Sodio (NaCl). Los daños típicamente ocurren en las superficies expuestas del concreto húmedo que están en contacto con suelos que contienen las sales antes mencionadas.

Exposición al agua de mar. En algunas regiones el agua de mar está menos diluida; sin embargo, los elementos constitutivos del agua del mar son básicamente constantes.

Ataque por ácidos. En general, el cemento Pórtland no tiene una buena resistencia a los ácidos; no obstante, puede tolerar algunos ácidos débiles, particularmente si la exposición es ocasional. El agua de drenaje de ciertas minas y aguas industriales puede contener o formar ácidos que atacan al concreto.

Carbonatación. Cuando el concreto está expuesto a CO_2 se origina una reacción que produce carbonatos. Esta reacción es acompañada por contracción. La carbonatación puede provocar el deterioro y una disminución del pH de la pasta cementicia, provocando la corrosión de las armaduras próximas a la superficie.

La oxidación de sulfatos precisa mucho oxígeno y solo puede dar acidez importante en las proximidades del nivel freático y en medio no saturado (Custodio & Llamas, 1996).

Tipo de corrosión en las armaduras de concreto y causas de desprotección

La corrosión es la destrucción de los metales, iniciada en su superficie, esta catástrofe puede ser de naturaleza química, pero en algunos casos transcurre electroquímicamente (González, 1989).

La corrosión puede presentar distintas formas según la localización de las zonas anódicas y catódicas, y la posible existencia de tensiones mecánicas importantes. En la figura 24 se representan los tipos de corrosión en armaduras de concreto (Andrade, 1989).

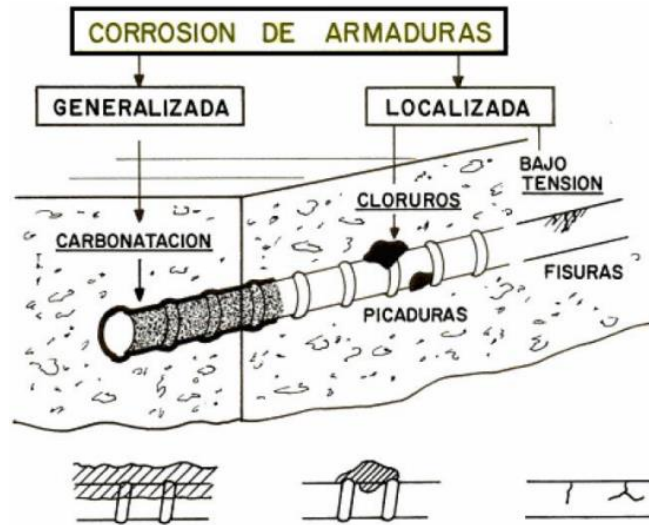


Figura 24. Tipos de corrosión en armaduras de concreto (Andrade, 1989).

La corrosión generalizada, es el proceso más común entre la mayoría de los metales y aleaciones, se produce por un descenso de la alcalinidad del concreto. La corrosión localizada, es caracterizada por la destrucción local de la capa pasivante, debido a la acción de un agente agresivo. La causa más común que induce este tipo de corrosión es la presencia de iones despasivantes, tales como los cloruros; que, al superar un determinado valor crítico, rompen localmente la capa pasivante. Éste último tipo de corrosión puede subdividirse en: corrosión por grietas o fisuras y corrosión por picaduras (K. Gómez, 2014).

Clasificación de la exposición ambiental

La norma mexicana NMX-C-403-ONNCCE-1999 establece las distintas clases de exposición a las que se pueden exponer los elementos de una estructura (Véase tabla 4). Además, la norma mexicana establece ciertos requisitos de acuerdo con la clase de exposición que se presente (Véanse tablas 5 y 6).

Tabla 4. Clases de exposición ambiental (“NMX-C-403-ONNCCE-1999,” n.d.).

Clase de exposición	Condiciones ambientales															
1	Ambiente seco: <ul style="list-style-type: none"> Interior de edificaciones habitables Componentes interiores que no se encuentran expuestos en forma directa al viento ni a suelos o agua Regiones con humedad relativa mayor al 60% por un lapso no mayor a tres meses al año 															
2a	Ambiente húmedo sin congelamiento: <ul style="list-style-type: none"> Interior de edificaciones con humedad relativa mayor al 60% más de tres meses al año Elementos exteriores expuestos al viento, pero no al congelamiento Elementos en suelos no reactivos o no agresivos, y/o en agua sin posibilidad de congelamiento 															
2b	Ambiente húmedo con congelamiento: <ul style="list-style-type: none"> Elementos exteriores expuestos al viento y al congelamiento Elementos en suelos no reactivos o no agresivos, y/o en agua con posibilidad de congelamiento 															
3	Ambiente húmedo con congelamiento y agentes descongelantes: <ul style="list-style-type: none"> Elementos exteriores expuestos al viento, con posibilidad de congelamiento y/o exposición a agentes descongelantes Elementos en suelos no reactivos o no agresivos y/o en agua con posibilidad de congelamiento y agentes químicos descongelantes 															
4	Ambiente marino: <ul style="list-style-type: none"> Elementos en zonas de humedad o sumergidas en el mar con una cara expuesta al aire Elementos en aire saturado de sales (zona costera) 															
5a	Ambiente de Agresividad química ligera (por gases, líquidos o sólidos): <ul style="list-style-type: none"> En contacto con agua: <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td>pH</td> <td style="text-align: right;">6.5-5.5</td> </tr> <tr> <td>CO₂ agresivo (en mg/L)</td> <td style="text-align: right;">15-30</td> </tr> <tr> <td>NH⁴⁺ (en mg/L)</td> <td style="text-align: right;">15-30</td> </tr> <tr> <td>Mg²⁺ (en mg/L)</td> <td style="text-align: right;">100-300</td> </tr> <tr> <td>SO₄²⁻ (en mg/L)</td> <td style="text-align: right;">200-600</td> </tr> </table> En contacto con suelo: <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td>Grado de acidez según Baumann – Gully</td> <td style="text-align: right;">mayor a 20</td> </tr> <tr> <td>SO₄²⁻ (en mg/kg de suelo secado al aire)</td> <td style="text-align: right;">2000-6000</td> </tr> </table> 	pH	6.5-5.5	CO ₂ agresivo (en mg/L)	15-30	NH ⁴⁺ (en mg/L)	15-30	Mg ²⁺ (en mg/L)	100-300	SO ₄ ²⁻ (en mg/L)	200-600	Grado de acidez según Baumann – Gully	mayor a 20	SO ₄ ²⁻ (en mg/kg de suelo secado al aire)	2000-6000	
pH	6.5-5.5															
CO ₂ agresivo (en mg/L)	15-30															
NH ⁴⁺ (en mg/L)	15-30															
Mg ²⁺ (en mg/L)	100-300															
SO ₄ ²⁻ (en mg/L)	200-600															
Grado de acidez según Baumann – Gully	mayor a 20															
SO ₄ ²⁻ (en mg/kg de suelo secado al aire)	2000-6000															
5b	Ambiente de agresividad química moderada (Por gases líquidos o sólidos): <ul style="list-style-type: none"> En contacto con agua: <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td>pH</td> <td style="text-align: right;">4.5-4.0</td> </tr> <tr> <td>CO₂ agresivo (en mg/L)</td> <td style="text-align: right;">31-60</td> </tr> <tr> <td>NH⁴⁺ (en mg/L)</td> <td style="text-align: right;">31-60</td> </tr> <tr> <td>Mg²⁺ (en mg/L)</td> <td style="text-align: right;">301-1500</td> </tr> <tr> <td>SO₄²⁻ (en mg/L)</td> <td style="text-align: right;">601-3000</td> </tr> </table> En contacto con suelo: <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td>SO₄²⁻ (en mg/kg de suelo secado al aire)</td> <td style="text-align: right;">6000-12000</td> </tr> </table> 	pH	4.5-4.0	CO ₂ agresivo (en mg/L)	31-60	NH ⁴⁺ (en mg/L)	31-60	Mg ²⁺ (en mg/L)	301-1500	SO ₄ ²⁻ (en mg/L)	601-3000	SO ₄ ²⁻ (en mg/kg de suelo secado al aire)	6000-12000			
pH	4.5-4.0															
CO ₂ agresivo (en mg/L)	31-60															
NH ⁴⁺ (en mg/L)	31-60															
Mg ²⁺ (en mg/L)	301-1500															
SO ₄ ²⁻ (en mg/L)	601-3000															
SO ₄ ²⁻ (en mg/kg de suelo secado al aire)	6000-12000															
5c	Ambiente de agresividad química alta (por gases, líquidos o sólidos): <ul style="list-style-type: none"> En contacto con agua: <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td>pH</td> <td style="text-align: right;">4.5-4.0</td> </tr> <tr> <td>CO₂ agresivo (en mg/L)</td> <td style="text-align: right;">61-100</td> </tr> <tr> <td>NH⁴⁺ (en mg/L)</td> <td style="text-align: right;">61-100</td> </tr> <tr> <td>Mg²⁺ (en mg/L)</td> <td style="text-align: right;">1501-3000</td> </tr> <tr> <td>SO₄²⁻ (en mg/L)</td> <td style="text-align: right;">3001-6000</td> </tr> </table> En contacto con suelo: <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td>SO₄²⁻ (en mg/kg de suelo secado al aire)</td> <td style="text-align: right;">>12000</td> </tr> </table> 	pH	4.5-4.0	CO ₂ agresivo (en mg/L)	61-100	NH ⁴⁺ (en mg/L)	61-100	Mg ²⁺ (en mg/L)	1501-3000	SO ₄ ²⁻ (en mg/L)	3001-6000	SO ₄ ²⁻ (en mg/kg de suelo secado al aire)	>12000			
pH	4.5-4.0															
CO ₂ agresivo (en mg/L)	61-100															
NH ⁴⁺ (en mg/L)	61-100															
Mg ²⁺ (en mg/L)	1501-3000															
SO ₄ ²⁻ (en mg/L)	3001-6000															
SO ₄ ²⁻ (en mg/kg de suelo secado al aire)	>12000															
5d	Ambiente de agresividad química muy alta (por gases, líquidos o sólidos): <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td>pH</td> <td style="text-align: right;"><4.0</td> </tr> <tr> <td>CO₂ agresivo (en mg/L)</td> <td style="text-align: right;">>100</td> </tr> <tr> <td>NH⁴⁺ (en mg/L)</td> <td style="text-align: right;">>100</td> </tr> <tr> <td>Mg²⁺ (en mg/L)</td> <td style="text-align: right;">>3000</td> </tr> <tr> <td>SO₄²⁻ (en mg/L)</td> <td style="text-align: right;">>6000</td> </tr> </table>	pH	<4.0	CO ₂ agresivo (en mg/L)	>100	NH ⁴⁺ (en mg/L)	>100	Mg ²⁺ (en mg/L)	>3000	SO ₄ ²⁻ (en mg/L)	>6000					
pH	<4.0															
CO ₂ agresivo (en mg/L)	>100															
NH ⁴⁺ (en mg/L)	>100															
Mg ²⁺ (en mg/L)	>3000															
SO ₄ ²⁻ (en mg/L)	>6000															

Tabla 5. Requisitos de durabilidad según la clase de exposición (“NMX-C-403-ONNCCE-1999,” n.d.).

Requisito		Clase de exposición según la tabla A.1.								
		1	2a	2b	3	4	5a	5b	5c	5d
Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Concreto reforzado	≤ 200	≤ 250	≤ 250	≤ 250	≤ 300	≤ 250	≤ 300	≤ 350	≤ 350
	Concreto presforzado o postensado	≤ 250								
Relación agua/cementante	Concreto reforzado	≤ .06	≤ .06	≤ .55	≤ .55	≤ .55	≤ .55	≤ .50	≤ .45	≤ .45
	Concreto presforzado o postensado	≤ .06	≤ .06							
Contenido de cemento para agregados gruesos entre 20 y 40 mm (kg/m ³)	Concreto reforzado	≤ 270	≤ 300	≤ 300	≤ 300	≤ 300	≤ 300	≤ 300	≤ 300	≤ 300
	Concreto presforzado o postensado	≤ 300	≤ 300	≤ 300	≤ 300					
Contenido de aire por tamaño máximo de	≤ 40 mm			ver clase	≥ 4					
	≤ 20 mm			3	≥ 5					
	≤ 10 mm				≥ 6					

agregado %. Se permite una tolerancia de \pm 1.5 %										
Requisitos adicionales para agregado				Resistentes al congelamiento						
Requisitos adicionales para cemento							Véase tablas A.2.b y A.2.c.			

Tabla 6. Especificaciones contra el ataque químico de agentes agresivos cuando existen sulfatos (“NMX-C-403-ONNCCE-1999,” n.d.)

Parámetro	Clase de exposición 5a		Clase de exposición 5b	Clase de exposición 5c	Clase de exposición 5d
	Ligera		Moderada	Alto	Muy alto
Tipo de cemento	CPO	RS	RS	RS	RS
Máxima relación agua/cementante	0.50	0.55	0.50	0.45	0.45
Mínimo contenido de cementante (kg/m ³)	330	300	330	370	370
Protección adicional	No necesaria	No necesaria	No necesaria	No necesaria	Necesaria

Calidad de las estructuras de concreto

El *American Concrete Institute* (ACI) clasifica los concretos según la clase de exposición a sulfatos en la que se encuentren y menciona requisitos según el tipo de daño al que se esté expuesto el concreto (Véase tabla 7). La tabla 8, muestra análisis típicos de agua que está en contacto con las estructuras de concreto, con la finalidad de conocer los valores normales a los que suelen estar expuestas las estructuras.

En la tabla 9, se pueden observar las categorías y clases de exposición en las que se puede encontrar la construcción y también una serie de requisitos para el concreto según sea el caso.

Tabla 7. Tipos de cemento requeridos para la exposición del concreto a los sulfatos en el suelo o en agua (ACI 201, 2001).

Exposición a los SO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻ (solubles en agua o en suelo), % masa	SO ₄ ²⁻ en agua, ppm	Tipo del cemento**	Relación agua-material cementante máxima, en masa	Mínima resistencia a compresión de diseño, f'c kg/cm ² (MPa) [lb/pulg ²]
Insignificante	Menos que 0.10	Menos de 150	Ningún tipo especial requerido	-	-
Moderado*	0.10 hasta 0.20	150 hasta 1500	II, MS, IP(MS), IS(MS), P(MS), I(PM)(MS), I(SM)(MS)	0.50	280 (28) [4000]
Severa	0.20 hasta 2.00	1500 hasta 10,000	V, HS	0.45	320(31) [4500]
Muy severa	Más de 2.00	Más de 10,000	V, HS	0.40	350 (35) [5000]

Tabla 8. Análisis típicos del agua de abastecimiento de las ciudades y agua de mar (ACI 201, 2001).

Ion o sustancia química	Análisis No.						Agua de mar*
	1	2	3	4	5	6	
Sílice (SiO ₂)	2.4	0.0	6.5	9.4	22.0	3.0	-
Fe ³⁺	0.1	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	-
Ca ²⁺	5.8	15.3	29.5	96.0	3.0	1.3	50 a 480
Mg ²⁺	1.4	5.5	7.6	27.0	2.4	0.3	260 a 1410
Na ⁺	1.7	16.1	2.3	183.0	215.0	1.4	2190 a 12000
K ⁺	0.7	0.0	1.6	18.0	9.8	0.2	70 a 550
HCO ₃ ⁻	14.0	35.8	122.0	334.0	549.0	4.1	-
SO ₄ ²⁻	9.7	59.9	5.3	121.0	11.0	2.6	580 a 2810
Cl ⁻	2.0	3.0	1.4	280.0	22.0	1.0	3960 a 20000
NO ₃ ⁻	0.5	0.0	1.6	0.2	0.5	0.0	-
Total, de sólidos disueltos	31.0	250.0	125.0	983.0	564.0	19.0	35000

Tabla 9. a) Categorías y clases de exposición; b) Requisitos para el concreto según la clase de exposición (American Concrete Institute, 2008).

Categoría	Severidad	Clase	Condición	
F Congelamiento y deshielo	No es aplicable	F0	Concreto no expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo	
	Moderada	F1	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y exposición ocasional a la humedad	
	Severa	F2	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y en contacto con la humedad	
	Muy severa	F3	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo que estará en contacto continuo con la humedad y expuesto a productos químicos descongelantes	
S Sulfato			Sulfatos solubles en agua (SO) en el suelo, % en peso	Sulfato (SO ₄) disuelto en agua, ppm
	No aplicable	S0	SO ₄ < 0.10	SO ₄ < 150
	Moderada	S1	0.10 ≤ SO ₄ ≤ 0.20	150 ≤ SO ₄ ≤ 1500 agua marina
	Severa	S2	0.20 ≤ SO ₄ ≤ 2.00	1500 ≤ SO ₄ ≤ 10000
	Muy severa	S3	SO ₄ > 2.00	SO ₄ > 10000
P Requiere baja permeabilidad	No aplicable	P0	En contacto con el agua donde no se requiere baja permeabilidad	
	Requerida	P1	En contacto con el agua donde se requiere baja permeabilidad	
C Protección Del Refuerzo Para la corrosión	No aplicable	C0	Concreto seco o protegido contra la humedad	
	Moderada	C1	Concreto expuesto a la humedad, pero no a una fuente externa de cloruros	
	Severa	C2	Concreto expuesto a la humedad y a una fuente externa de cloruros provenientes de productos químicos descongelantes, sal, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen	

Clase de exposición	Rel. a/c máx.	F'c mín. MPa	Requisitos mínimos adicionales			
			Contenido de aire			Límites en los cementantes
F0	N/A	17	N/A			N/A
F1	0.45	31	Tabla 4.4.1			N/A
F2	0.45	31	Tabla 4.4.1			N/A
F3	0.45	31	Tabla 4.4.1			Tabla 4.4.2
			Tipos de material cementante*			Aditivo cloruro de calcio
			ASTM C 150	ASTM C 595	ASTM C 1157	
S0	N/A	17	Sin restricción	Sin restricción	Sin restricción	Sin restricción
S1	0.50	28	II ¹²	IP(MS), IS(<70) (MS)	MS	Sin restricción
S2	0.45	31	V ⁴	IP(HS), IS(<70) (HS)	HS	No se permite
S3	0.45	31	V Puzolanas o escoria ⁵	IP(HS) y puzolanas o escoria ⁵ o IS (<70) (HS) y puzolanas O escoria ³	HS y puzolanas o escoria ⁵	No se permite
P0	N/A	17	Ninguna			
P1	0.50	28	Ninguna			
			Contenido máximo de iones de cloruro soluble en agua en el concreto, porcentaje por peso de cemento			Requisitos relacionados
			Concreto reforzado	Concreto preesforzado		
C0	N/A	17	1.00	0.05	Ninguno	
C1	N/A	17	0.30	0.06		
C2	0.40	35	0.15	0.06	7.7.6, 18.16 ²	

Acidez del agua

Ésta se define como la capacidad de un tipo de agua para neutralizar bases. Si bien es poco común que las aguas naturales tengan acidez, ésta se puede presentar debido a la oxidación de sulfuros, hidrolisis de iones del Fe^{3+} , Al^{3+} y del NH_4^+ . Al ordenar los metales más usuales, de acuerdo con su facilidad de reacción o de reducción de sus óxidos, se obtiene la llamada serie electromotriz o serie electroquímica de los metales (Véase figura 25), (Calleja, 1966).

Reaccionan con	Nombre	Símbolo	Los óxidos
Agua fría Ácidos (violentamente)	Litio	Li	Ni por el hidrógeno, ni por el óxido de carbono
	Potasio	K	
	Bario	Ba	
	Estroncio	Sr	
	Calcio	Ca	
	Sodio	Na	
Vapor de agua Ácidos	Magnesio	Mg	Por el carbón a alta temperatura
	Aluminio	Al	
	Manganeso	Mn	
	Zinc	Zn	
Ácidos oxidantes (sin desprender hidrógeno)	Hierro	Fe	Por el hidrogeno y por el óxido de carbono a alta temperatura
	Níquel	Ni	
	Estaño plomo	Sn Pb	
	Hidrógeno	H	
	Cobre	Cu	
Agua regia	Bismuto	Bi	Por simple calentamiento (descomposición)
	Plata	Ag	
	Mercurio	Hg	
	Oro Platino	Au Pt	

Figura 25. Relación entre acidez del agua con metales que producen corrosión en armaduras de concreto (Calleja, 1966).

CAPÍTULO 3 (METODOLOGÍA)

Con la finalidad de cumplir con los objetivos de la presente investigación, se realizó un esquema metodológico general. La metodología constó de 7 etapas (Véase figura 26), en el presente capítulo se detalla cada una de ellas.

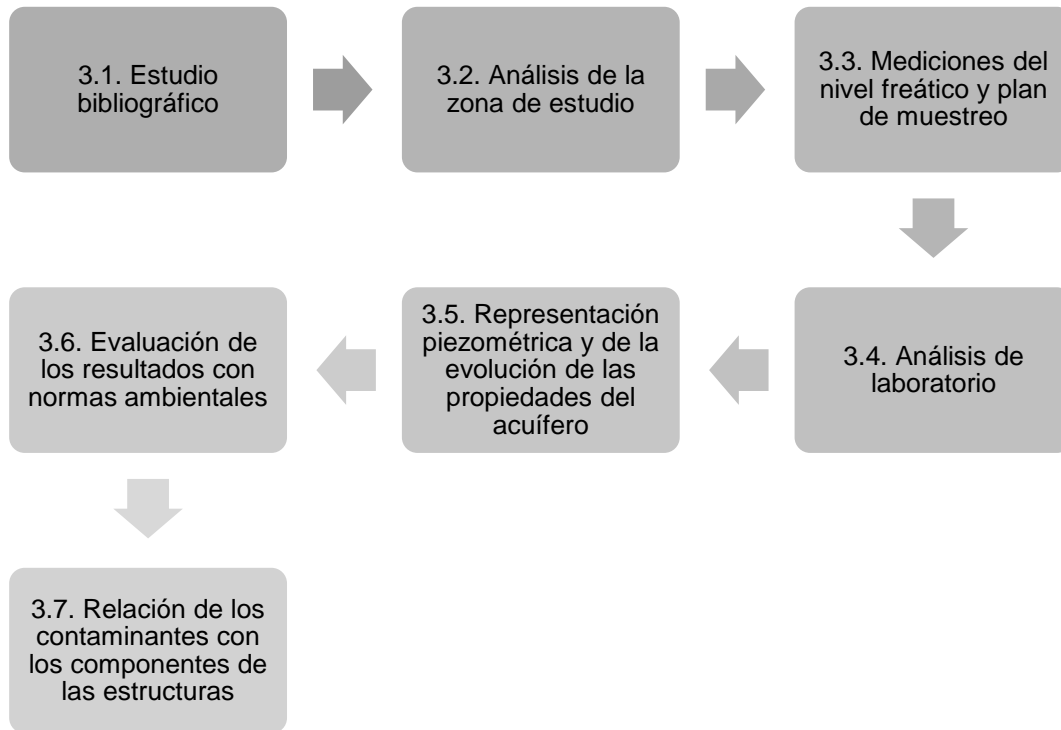


Figura 26. Esquema metodológico (elaboración propia, 2021).

3.1. Estudio bibliográfico

Se realizó la búsqueda bibliográfica correspondientes a registros anteriores de la hidrogeología e hidrogeoquímica de la zona en bases de datos, proyectos de investigación, sondeos exploratorios, etc. Con la finalidad de proyectar la evolución de las características fisicoquímicas del acuífero (Véanse Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 19 en la página 23 en la página 24 y en la página 58).

3.2. Análisis de la zona de estudio

La zona de estudio comprende las instalaciones del campus de CU de la UANL, la cual se encuentra dentro del AMM, entre San Nicolás de los Garza y Monterrey. Sus colindancias son: al norte, la Av. Palacio de Justicia; al sur, el Antiguo Campo Militar; al oriente, la Av. Universidad y al poniente la Av. Manuel L.

Barragán. El campus de CU de la UANL se encuentra limitado al este por la empresa acerera TERNIUM, al norte por el arroyo del Topo Chico, al oeste por FERROMEX y al sur por parque Niños Héroes (Véase figura 27).



Figura 27. Zona de estudio con sus sitios de muestreo identificados (elaboración propia, 2021).

3.2.1. Ubicación de los sitios de muestreo

Para la medición y el muestreo de agua subterránea se consideraron 7 pozos dentro del área de estudio, también se realizaron análisis de suelo mediante la toma de 3 muestras de tierra en puntos estratégicos (Véase figura 27). Las especificaciones de cada punto se observan en la tabla 10.

Tabla 10. Desglose de simbología para puntos de muestreo (elaboración propia, 2020).

Clave	Información de referencia	Localización (Coord. UTM) este	Localización (Coord. UTM) norte	Elevación del terreno (msnm)
PCU-1	Instituto FIC, por el departamento topografía; uso: riego de jardines.	-100,3078028	25,7326302	514.0
PCU-2	Hidráulica, por el departamento hidráulica IIC; uso: riego de jardines.	-100,3061233	25,7315167	514.5
PCU-3	Noria, en uso para riego de jardines municipales, equipado.	-100,3086061	25,7249567	513.5
PCU-4	Rectoría, suministro de agua para riego de jardines, no equipado.	-100,3104743	25,7209735	517.5
PCU-5	Estadio, estacionamiento de Cd. Universitaria, por Av. Universidad; uso: sin uso.	-100,310398	25,7211700	521.0
PCU-6	Estacionamiento Cd. Universitaria, por Av. Barragán; uso: sin uso.	-100,3166012	25,7228363	523.8
PCU-7	Facultad de Ingeniería Civil, estacionamiento de maestros; pozo de sondeo exploratorio	-100.314598	25.724472	524.3
SCU-1	Suelos del Estacionamiento Cd. Universitaria, por Av. Universidad	-100,311042	25,7216778	522.0
SCU-2	Suelos del Estacionamiento Cd. Universitaria, zona central	-100,3137321	25,7222219	524.0
SCU-3	Suelos del Estacionamiento Cd. Universitaria, por Av. Barragán	-100,3164398	25,7229387	524.0

3.2.2. Problemas de la zona de estudio

El campus de CU se encuentra en una zona industrial donde se realizan principalmente actividades de la industria metalúrgica (Véase figura 28). Parte de los desechos de estas industrias se transportan hasta el agua subterránea de la zona mediante procesos de infiltración alterando las propiedades naturales del vital líquido. Otra importante fuente de contaminación es la antropogénica. Dicha contaminación proviene de los desechos producidos por los usuarios de las instalaciones de la UANL, así como de los desechos resultantes de los eventos masivos en el Estadio Universitario.

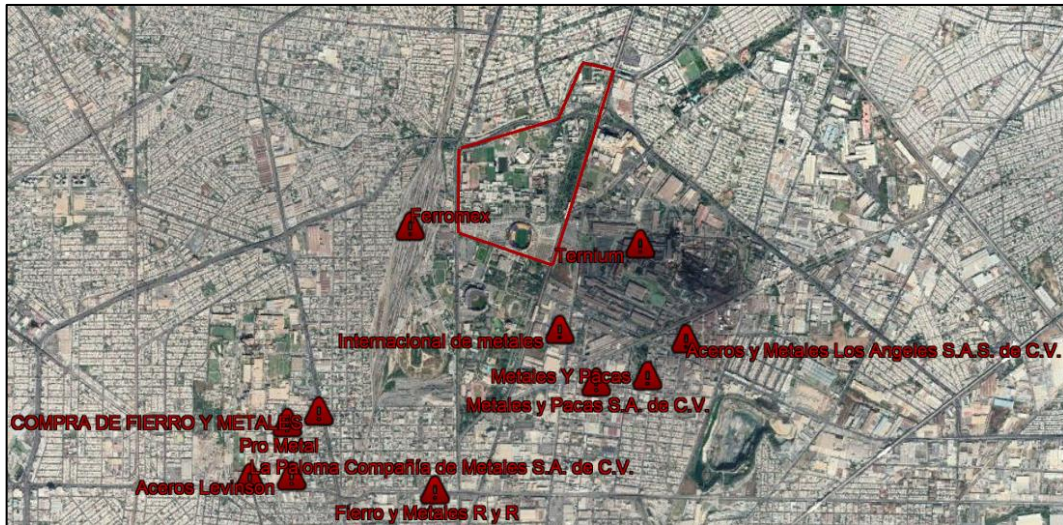


Figura 28. Industrias metalúrgicas alrededor de la zona de estudio (Google, n.d.).

Pérez 2019, evidenció la presencia de residuos industriales (hollín) provenientes de industrias metalúrgicas como TERNIUM y FERROMEX, que se lograron observar en la línea dos del Metro estación Universidad (Véanse figuras 29a y 29b). También reveló desechos antropogénicos en el drenaje sanitario de la UANL, posteriores a un evento masivo en el Estadio Universitario (Véase figura 30). Es importante mencionar que dichos contaminantes se infiltran al agua subterránea.



Figura 29. a) Línea dos del metro con presencia de Hollín.,



b) Zoom a elemento del metro línea 2 (Pérez, 2019).



Figura 30. Desechos fecales posteriores a un evento masivo en el Estadio Universitario (Pérez, 2019).

3.2.3. Afectación a las estructuras universitarias

Los elementos estructurales de la Torre de la Rectoría se ven perjudicados debido a su exposición a la intemperie (Véase figura 31), además, los contaminantes existentes en la zona aceleran el proceso de corrosión y degradación de dichas estructuras (Pérez, 2019).



Figura 31. Elementos de acero de la estructura de la Torre de la Rectoría afectados por la corrosión (Pérez, 2019).

3.3. Medición del nivel freático y plan de muestreo de muestreo

El primer paso fue la selección de los sitios de muestreo de cada uno de los aprovechamientos hidráulicos, dependiendo de su accesibilidad para muestrearlo.

Los datos que se registran en las visitas a campo son: la temperatura del agua, el pH, la conductividad eléctrica y el nivel freático; además de apuntar algunas observaciones de utilidad para describir alguna anomalía.

En total, durante esta investigación se realizaron 8 campañas de medición del nivel freático, 2 campañas de muestreo de agua y 2 campañas de muestreo de suelo, respectivamente.

3.3.1. Medición del nivel freático

En campo se determinó el nivel freático de los pozos con la finalidad de definir las alturas piezométricas y representarlas digitalmente en cartas piezométricas.

Primero se efectuó un recorrido en campo, con la finalidad de establecer los distintos aprovechamientos hidráulicos disponibles en la zona del Campus de Ciudad Universitaria. Después de la identificación de los aprovechamientos hidráulicos, se consideraron 7 pozos profundos. Se realizaron las mediciones del nivel freático en épocas ordinario, sequía y extraordinario.

Para realizar una carta piezométrica es necesario conocer los niveles freáticos del agua y la elevación del terreno (msnm). Se utilizó una sonda hidrogeológica (Solinst) para medir los niveles freáticos del agua. El procedimiento residió en encender e introducir la sonda en los aprovechamientos hidráulicos con la precaución de no tocar las paredes del pozo, la sonda tiene un electrodo en su parte superior, el cual al tocar el agua emite una señal al detector que produce un sonido avisando el contacto con el agua subterránea, una vez establecido el contacto se toma lectura de la profundidad del nivel freático, temperatura y conductividad eléctrica. La altura respecto al nivel del mar se definió con un altímetro digital BRUNTON y las coordenadas se obtuvieron con un GPS GARMIN OREGON 450 (Global Positioning System) (Véase figura 32).



Figura 32. Equipo necesario para realizar la medición del nivel freático (De la fuente, 2021).

La figura 31 corresponde a una de las ocho campañas de medición de niveles freáticos realizadas durante esta investigación. En las imágenes se pueden observar los 7 pozos analizados, así como el equipo utilizado y el procedimiento.



Figura 33. Medición del nivel freático (elaboración propia, 2021).

Datos registrados medición #1

La medición #1 corresponde a la tormenta Fernando (Véase tabla 11), los niveles freáticos reportados son considerados para la época de eventos extraordinarios. Los niveles freáticos se presentaron desde 12.17m en el PCU-6 hasta 15.29m en el PCU-2, la temperatura del agua varió de entre los valores de 24.9 hasta 25.3°C respondiendo a la temperatura atmosférica del lugar, la conductividad eléctrica por sus valores desde 1358 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el pozo PCU-5 hasta 5919 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el pozo PCU-1 clasifica al agua subterránea como salobre (Véase Tabla 27 en la página 77).

Tabla 11. Datos registrados medición tormenta Fernando, 06/09/2019 (elaboración propia, 2021).

POZOS	PARÁMETRO	TORMENTA FERNANDO (06/09/2019)	POZOS	PARÁMETRO	TORMENTA FERNANDO (06/09/2019)
PCU-1 INSTITUTO	T° (°C)	25.3	PCU-5 ESTADIO	T° (°C)	24.9
	COND. (μS/cm)	5919		COND. (μS/cm)	1358
	NF. (M)	14.7		NF. (M)	14.55
PCU-2 HIDRÁULICA	T° (°C)	25.5	PCU-6 CASA BLANCA	T° (°C)	25.4
	COND. (μS/cm)	5955		COND. (μS/cm)	5654
	NF. (M)	15.29		NF. (M)	12.17
PCU-3 NORIA	T° (°C)	25.3	PCU-7 FIC	T° (°C)	NA
	COND. (μS/cm)	5609		COND. (μS/cm)	NA
	NF. (M)	14.83		NF. (M)	NA
PCU-4 RECTORÍA	T° (°C)	25.3	Observaciones: Ninguna		
	COND. (μS/cm)	5562			
	NF. (M)	12.73			

Datos registrados medición #2

La medición #2 fue correspondiente a la Huracán Hanna (Véase tabla 12), los niveles freáticos reportados son considerados para la época de eventos extraordinarios. Los niveles freáticos se presentaron desde 12.25m en el PCU-6 hasta 14.61m en el PCU-2, en esta medición se obtuvieron los niveles freáticos más elevados hasta la fecha, a excepción de los datos reportados durante el huracán Alex; la temperatura del agua varió de entre los valores 24.9 hasta 27.1°C respondiendo a la temperatura atmosférica del lugar, la conductividad eléctrica con sus valores desde 5001 μS/cm en el pozo PCU-5 hasta 5644 μS/cm en el pozo PCU-6, clasifica al agua subterránea como salobre (Véase Tabla 27 en la página 77).

Tabla 12. Datos registrados medición Huaracan Hanna, 31/08/2020 (elaboración propia, 2021).

POZOS	PARÁMETRO	HURACAN HANNA (31/08/2020)	POZOS	PARÁMETRO	HURACAN HANNA (31/08/2020)
PCU-1 INSTITUTO	T° (°C)	25.4	PCU-5 ESTADIO	T° (°C)	24.9
	COND. (μS/cm)	5002		COND. (μS/cm)	5533
	NF. (M)	13.24		NF. (M)	14.24
PCU-2 HIDRÁULICA	T° (°C)	25.5	PCU-6 CASA BLANCA	T° (°C)	27.1
	COND. (μS/cm)	5330		COND. (μS/cm)	5644
	NF. (M)	14.61		NF. (M)	12.25
PCU-3 NORIA	T° (°C)	25.8	PCU-7 FIC	T° (°C)	NA
	COND. (μS/cm)	5001		COND. (μS/cm)	NA
	NF. (M)	13.89		NF. (M)	NA
PCU-4 RECTORÍA	T° (°C)	25.3	Observaciones: Ninguna		
	COND. (μS/cm)	5568			
	NF. (M)	12.3			

Datos registrados medición #3

La medición #3 fue correspondiente al 27 de noviembre del 2020 (Véase tabla 13), los niveles freáticos reportados son considerados para la época de eventos ordinarios. Los niveles freáticos se presentaron desde 12.33m en el PCU-6 hasta 15.98m en el PCU-2, la temperatura del agua varió de entre los valores 24.8 hasta 25.4°C respondiendo a la temperatura atmosférica del lugar, la conductividad eléctrica clasifica el agua subterránea como salobre (Véase Tabla 27 en la página 77) con valores desde 5507 $\mu\text{S/cm}$ en el pozo PCU-5 hasta 6012 $\mu\text{S/cm}$ en el pozo PCU-1.

Tabla 13. Datos registrados medición 27/11/20 (elaboración propia, 2021).

POZOS	PARÁMETRO	(27/11/2020)	POZOS	PARÁMETRO	(27/11/2020)
PCU-1 INSTITUTO	T° (°C)	25.5	PCU-5 ESTADIO	T° (°C)	24.8
	COND. ($\mu\text{S/cm}$)	6012		COND. ($\mu\text{S/cm}$)	5507
	NF. (M)	14.6		NF. (M)	14.46
PCU-2 HIDRÁULICA	T° (°C)	25.4	PCU-6 CASA BLANCA	T° (°C)	25
	COND. ($\mu\text{S/cm}$)	5740		COND. ($\mu\text{S/cm}$)	5635
	NF. (M)	15.98		NF. (M)	12.33
PCU-3 NORIA	T° (°C)	25.1	PCU-7 FIC	T° (°C)	NA
	COND. ($\mu\text{S/cm}$)	5706		COND. ($\mu\text{S/cm}$)	NA
	NF. (M)	15.3		NF. (M)	NA
PCU-4 RECTORÍA	T° (°C)	25.3	Observaciones: Ninguna		
	COND. ($\mu\text{S/cm}$)	5571			
	NF. (M)	12.84			

Datos registrados medición #4

La medición #4 fue correspondiente al 26 de enero del 2021 (Véase tabla 14), los niveles freáticos reportados son considerados para la época de sequía. Los niveles freáticos se presentaron desde 12.27m en el PCU-7 hasta 15.98m en el PCU-2, la temperatura del agua varió de entre los valores 24.8 hasta 25.5°C respondiendo a la temperatura atmosférica del lugar, la conductividad eléctrica la temperatura atmosférica del lugar, la conductividad eléctrica clasifica el agua subterránea como salobre (Véase Tabla 27 en la página 77) con valores desde 5516 $\mu\text{S/cm}$ en el pozo PCU-5 hasta 5992 $\mu\text{S/cm}$ en el pozo PCU-2.

Tabla 14. Datos registrados medición 26/01/21 (elaboración propia, 2021).

POZOS	PARÁMETRO	(26/01/2020)	POZOS	PARÁMETRO	(26/01/2020)
PCU-1 INSTITUTO	T° (°C)	25.5	PCU-5 ESTADIO	T° (°C)	24.8
	COND. (μS/cm)	5953		COND. (μS/cm)	5516
	NF. (M)	14.76		NF. (M)	14.62
PCU-2 HIDRÁULICA	T° (°C)	25.4	PCU-6 CASA BLANCA	T° (°C)	25.3
	COND. (μS/cm)	5992		COND. (μS/cm)	5626
	NF. (M)	15.98		NF. (M)	12.31
PCU-3 NORIA	T° (°C)	25	PCU-7 FIC	T° (°C)	25
	COND. (μS/cm)	5684		COND. (μS/cm)	5590
	NF. (M)	15.38		NF. (M)	12.27
PCU-4 RECTORÍA	T° (°C)	25.3	Observaciones: Ninguna		
	COND. (μS/cm)	5571			
	NF. (M)	12.89			

Datos registrados medición #5

La medición #5 fue correspondiente al 28 de mayo del 2021 (Véase tabla 15), los niveles freáticos reportados son considerados para la época de sequía. Los niveles freáticos se presentaron desde 12.48m en el PCU-7 hasta 16.26m en el PCU-2, la temperatura del agua varió de entre los valores 24.8 hasta 25.4°C respondiendo a la temperatura atmosférica del lugar, la conductividad eléctrica clasifica el agua subterránea como salobre (Véase Tabla 27 en la página 77) con valores desde 5472 μS/cm en el pozo PCU-5 hasta 5786 μS/cm en el pozo PCU-2.

Tabla 15. Datos registrados medición 28/05/21 (elaboración propia, 2021).

POZOS	PARÁMETRO	(28/05/2021)	POZOS	PARÁMETRO	(28/05/2021)
PCU-1 INSTITUTO	T° (°C)	25.4	PCU-5 ESTADIO	T° (°C)	24.8
	COND. (μS/cm)	5768		COND. (μS/cm)	5472
	NF. (M)	15.23		NF. (M)	15.28
PCU-2 HIDRÁULICA	T° (°C)	25.4	PCU-6 CASA BLANCA	T° (°C)	25.1
	COND. (μS/cm)	5786		COND. (μS/cm)	5565
	NF. (M)	16.26		NF. (M)	12.64
PCU-3 NORIA	T° (°C)	25.3	PCU-7 FIC	T° (°C)	25
	COND. (μS/cm)	5598		COND. (μS/cm)	5549
	NF. (M)	15.95		NF. (M)	12.48
PCU-4 RECTORÍA	T° (°C)	25.4	Observaciones: Ninguna		
	COND. (μS/cm)	5520			
	NF. (M)	13.13			

Datos registrados medición #6

La medición #6 fue correspondiente al 21 de junio del 2021 (Véase tabla 16), los niveles freáticos reportados son considerados para la época de sequía. Los

niveles freáticos se presentaron desde 12.36m en el PCU-7 hasta 17m en el PCU-2, en este caso los valores del nivel freático son considerados como niveles dinámicos, debido a esto, es común que se presente turbiedad en el agua a la hora del muestreo lo cual altera los resultados de las concentraciones de los metales analizados. La temperatura del agua varió de entre los valores 24.9 hasta 25.4°C respondiendo a la temperatura atmosférica del lugar, la conductividad eléctrica clasifica el agua subterránea como salobre (Véase Tabla 27 en la página 77) con valores desde 5482 $\mu\text{S/cm}$ en el pozo PCU-5 hasta 5840 $\mu\text{S/cm}$ en el pozo PCU-2.

Tabla 16. Datos registrados medición 21/06/21 (elaboración propia, 2021).

POZOS	PARÁMETRO	(21/06/2021)	POZOS	PARÁMETRO	(21/06/2021)
PCU-1 INSTITUTO	T° (°C)	25.4	PCU-5 ESTADIO	T° (°C)	24.9
	COND. ($\mu\text{S/cm}$)	5784		COND. ($\mu\text{S/cm}$)	5482
	NF. (M)	15.98 (PRENDIDO)		NF. (M)	15.23
PCU-2 HIDRÁULICA	T° (°C)	25.4	PCU-6 CASA BLANCA	T° (°C)	25.3
	COND. ($\mu\text{S/cm}$)	5840		COND. ($\mu\text{S/cm}$)	5577
	NF. (M)	17.00 (PRENDIDO)		NF. (M)	12.58
PCU-3 NORIA	T° (°C)	25.4	PCU-7 FIC	T° (°C)	25.1
	COND. ($\mu\text{S/cm}$)	5608		COND. ($\mu\text{S/cm}$)	5560
	NF. (M)	15.69		NF. (M)	12.36
PCU-4 RECTORÍA	T° (°C)	25.4	Observaciones: Los pozos PCU1 y PCU-2 se encontraban Encendidos.		
	COND. ($\mu\text{S/cm}$)	5529			
	NF. (M)	12.91			

Datos registrados medición #7

La medición #7 fue correspondiente al 14 de septiembre del 2021 (Véase tabla 17), los niveles freáticos reportados son considerados para la época de ordinario. Los niveles freáticos se presentaron desde 12.46m en el PCU-7 hasta 16.15m en el PCU-2, la temperatura del agua varió de entre los valores 25°C hasta 25.7°C respondiendo a la temperatura atmosférica del lugar, la conductividad eléctrica clasifica el agua subterránea como salobre (Véase Tabla 27 en la página 77) con valores desde 5478 $\mu\text{S/cm}$ en el pozo PCU-5 hasta 5832 $\mu\text{S/cm}$ en el pozo PCU-2.

Tabla 17. Datos registrados medición 14/09/21 (elaboración propia, 2021).

POZOS	PARÁMETRO	(14/09/2021)	POZOS	PARÁMETRO	(14/09/2021)
PCU-1 INSTITUTO	T° (°C)	25.7	PCU-5 ESTADIO	T° (°C)	25
	COND. (μS/cm)	5776		COND. (μS/cm)	5478
	NF. (M)	15.18		NF. (M)	15.43
PCU-2 HIDRÁULICA	T° (°C)	25.4	PCU-6 CASA BLANCA	T° (°C)	25.3
	COND. (μS/cm)	5832		COND. (μS/cm)	5578
	NF. (M)	16.15		NF. (M)	12.72
PCU-3 NORIA	T° (°C)	25.4	PCU-7 FIC	T° (°C)	25.1
	COND. (μS/cm)	5598		COND. (μS/cm)	5553
	NF. (M)	15.8		NF. (M)	12.46
PCU-4 RECTORÍA	T° (°C)	25.4	Observaciones:	Se observo la presencia de basura Dentro del PCU-6.	
	COND. (μS/cm)	5519			
	NF. (M)	13			

Datos registrados medición #8

La medición #8 fue correspondiente al 2 de octubre del 2021 (Véase tabla 18), los niveles freáticos reportados son considerados para la época de ordinario. Los niveles freáticos se presentaron desde 12.45m en el PCU-7 hasta 16.15m en el PCU-2, la temperatura del agua varió de entre los valores 24.8°C hasta 25.4°C respondiendo a la temperatura atmosférica del lugar, la conductividad eléctrica clasifica el agua subterránea como salobre (Véase Tabla 27 en la página 77) con valores desde 5476 μS/cm en el pozo PCU-5 hasta 5866 μS/cm en el pozo PCU-2.

Tabla 18. Datos registrados medición 02/10/21 (elaboración propia, 2021).

POZOS	PARÁMETRO	(02/10/2021)	POZOS	PARÁMETRO	(02/10/2021)
PCU-1 INSTITUTO	T° (°C)	25.4	PCU-5 ESTADIO	T° (°C)	24.8
	COND. (μS/cm)	5800		COND. (μS/cm)	5476
	NF. (M)	15.18		NF. (M)	15.51
PCU-2 HIDRÁULICA	T° (°C)	25.4	PCU-6 CASA BLANCA	T° (°C)	24.8
	COND. (μS/cm)	5866		COND. (μS/cm)	5586
	NF. (M)	16.15		NF. (M)	12.76
PCU-3 NORIA	T° (°C)	25.4	PCU-7 FIC	T° (°C)	25
	COND. (μS/cm)	5582		COND. (μS/cm)	5554
	NF. (M)	15.82		NF. (M)	12.45
PCU-4 RECTORÍA	T° (°C)	25.4	Observaciones:	Se observo la presencia de basura Dentro del PCU-6.	
	COND. (μS/cm)	5519			
	NF. (M)	13.05			

Los altos valores de conductividad eléctrica indican un elevado contenido de iones disueltos (Custodio & LLamas, 1983). Lo cual representa un indicio de agua contaminada.

A continuación, se presenta la tabla 19 representando las mediciones del nivel freático realizadas a lo largo de este proyecto (2020-2021), Así como, mediciones del nivel freático obtenidas en investigaciones anteriores (2016-2019).

Tabla 19. Mediciones del nivel freático desde el año 2017 hasta la actualidad (elaboración propia, 2021).

POZOS	PARÁMETRO	Elaboración propia, 2021					Elaboración propia, 2020.					De León Rodríguez, 2019.					Padilla Morín, et al., 2018.	García González, 2017.			
		MEDICIÓN (02/10/2021)	MEDICIÓN (14/09/2021)	MUESTREO 2 (21/06/2021)	MEDICIÓN (28/05/2021)	MUESTREO 1 (26/01/2021)	MEDICIÓN (27/11/20)	HURACÁN HANNA (31/07/2020)	TORMENTA FERNANDO (06/09/2019)	MUESTREO LICENCIATURA	ORDINARIO (15/05/2019)	ORDINARIO (24/03/2019)	ORDINARIO (15/03/2019)	SEQUÍA (04/02/2019)	SEQUÍA (16/12/18)	SEQUÍA (17/08/2018)	Mayo del 2018	Mayo del 2017	Febrero del 2017	Julio de 2016	Mayo del 2016
PCU-1	T° (°C)	25.4	25.7	25.4	25.4	25.5	25.5	25.4	25.3												
	COND. (μS/cm)	5800	5776	5784	5768	5953	6012	5002	5919	5917								1683			
	NF. (M)	15.18	15.18	15.98 *	15.23	14.76	14.6	13.24	14.7	15.04	15	15.01	15.04	14.87	14.51	14.93		14.98	14.82	14.93	15
PCU-2	T° (°C)	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.5	25.5							25.4					
	COND. (μS/cm)	5866	5832	5840	5786	5992	5740	5330	5955							1453					
	NF. (M)	16.15	16.15	17.00 *	16.26	15.98	15.98	14.61	15.29		16.27	16.3	16.29	16.25	15.64	16.07	16.27	16.06	15.85	16.07	16.42
PCU-3	T° (°C)	25.4	25.4	25.4	25.3	25	25.1	25.8	25.3							25.3					
	COND. (μS/cm)	5582	5598	5608	5598	5684	5706	5001	5609	5680						1113	1238				
	NF. (M)	15.82	15.8	15.69	15.95	15.38	15.3	13.89	14.83	15.61	15.57	15.6	15.61	15.52	15.3	15.53	15.52	15.52	15.37	15.53	15.64
PCU-4	T° (°C)	25.4	25.4	25.4	25.4	25.3	25.3	25.3	25.3							25.4					
	COND. (μS/cm)	5519	5519	5529	5520	5571	5571	5568	5562	5603						892	902				
	NF. (M)	13.05	13	12.91	13.13	12.89	12.84	12.3	12.73	12.45	12.18	12.21	12.3	12.27	11.92	12.2	12.85	12.88	12.73	12.92	12.97
PCU-5	T° (°C)	24.8	25	24.9	24.8	24.8	24.8	24.9	24.9							24.9					
	COND. (μS/cm)	5476	5478	5482	5472	5516	5507	5533	1358	1296						816	819				
	NF. (M)	15.51	15.43	15.23	15.28	14.62	14.46	14.24	14.55	15.08	14.36	15.08	15.08	14.82	14.35	13.93	14.4	14.76	14.52	14.71	14.9
PCU-6	T° (°C)	12.76	25.3	25.3	25.1	25.3	25	27.1	25.4							25.3					
	COND. (μS/cm)	5586	5578	5577	5565	5626	5635	5644	5654	5559						979	987				
	NF. (M)	12.76	12.72	12.58	12.64	12.31	12.33	12.25	12.17	12.3	12.46	12.45	12.45	12.41	12.36	12.41	12.35	12.42	12.34	12.36	12.55
PCU-7	T° (°C)	25	25.1	25.1	25	25															
	COND. (μS/cm)	5554	5553	5560	5549	5590															
	NF. (M)	12.45	12.46	12.36	12.48	12.27															

3.3.2. Campaña de muestreo

▪ **Muestras de agua**

Las muestras fueron tomadas siguiendo las indicaciones de la norma mexicana **NOM-230-SSA1-2002** "Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua" (Véase figura 34).



Figura 34. Muestreo de agua subterránea en aprovechamientos hidráulicos (2021).

Metodología para el muestreo

1. Identificar el lugar de muestreo y preparar los equipos e implementos necesarios.

Previamente se había identificado el lugar del muestreo y se habían identificado los aprovechamientos hidráulicos (Véanse figura 27 y tabla 10). El equipo necesario para el muestreo fue el siguiente:

- sonda hidrogeológica marca "Solinst"
- envases de plástico con capacidad de 80ml
- hielera con tapa
- agua destilada

- gasas estériles
- equipos muestreadores comerciales, de PVC
- pH-metro

2. Realizar la medición de los parámetros fisicoquímicos temperatura, pH y conductividad en campo con los equipos respectivos.

La temperatura se debe determinar en el momento de tomar la muestra. Se recomienda medir «in situ» la conductividad y dureza y, si es posible el pH (Custodio & LLamas, 1983).

La medición de la temperatura y la conductividad se realizó utilizando la Sonda Hidrogeológica, mientras que el pH se midió haciendo uso del pH-metro.

Los parámetros temperatura y conductividad eléctrica, fueron reportados en la sección anterior (Véase sección 3.3.1. Medición del nivel freático).

A continuación, en la tabla 20 se presentan los registros de pH correspondientes al muestreo uno (26 de enero del 2021) y al muestreo dos (21 de junio del 2021).

Tabla 20. Registros de pH (elaboración propia, 2021),

POZOS	pH	
	Muestreo 1	Muestreo 2
PCU-1	6.8	7
PCU-3	6.7	7.1
PCU-4	7	7.1
PCU-5	7	7.1
PCU-6	7.1	7.2
PCU-7	7.1	7.1

3. Recolectar las muestras, proceder al llenado de los frascos y cerrar herméticamente.

El muestreo se realizó cuidadosamente, evitando que se contaminara el tapón, la boca y el interior del envase. Se tomó el agua del pozo en estudio bajando cuidadosamente el muestreador y evitando que tocara las paredes del pozo. Con el agua extraída se enjuagó el interior del envase, así como su tapa. Posteriormente, se realizó la toma de la muestra y se selló herméticamente el envase.

4. Identificar los frascos con su clave correspondiente, almacenar las muestras y trasladarlas al laboratorio.

Los frascos se identificaron en campo con su clave correspondiente tanto en el frasco como en la tapa.

La NOM-230-SSA1-2002 establece un periodo máximo de 180 días de almacenamiento de las muestras de agua para análisis de metales.

Solo se realizaron análisis de metales debido a que se dio importancia a éstos por encontrarse el área de estudio en una zona rodeada por industrias del acero. Sin embargo, se consideraron también análisis de cloruros y sulfatos de estudios anteriores.

▪ **Muestras de suelo**

Las aguas subterráneas contienen compuestos cuyo origen y cantidad dependen, entre otros muchos factores de la composición del suelo (Castaño, 2003).

Los muestreos de suelo se realizaron debido a que se tienen antecedentes de concentraciones elevadas de metales en los suelos de la zona de estudio. De ser así, dichos contaminantes podrían ser transportados hacia el agua subterránea mediante el fenómeno de infiltración.

En la figura 35 se logran apreciar las tonalidades de las muestras de suelo. La tonalidad café, común de la arcilla se observa en los sitios de muestreo SCU-2 y SCU-3, mientras que el sitio de muestreo SCU-1 presenta una tonalidad oscura, con grandes cantidades de residuos rojizos, guindos y plateados. Es importante mencionar que en los 3 sitios de muestreo de suelo se encontraron metales, sin embargo, el SCU-1 (sitio más cercano a Ternium) presentó mayores concentraciones en ambas mediciones.

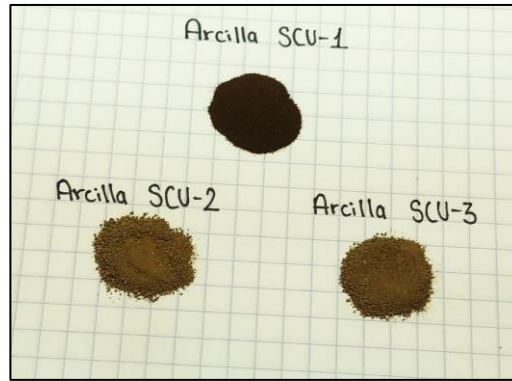


Figura 35. Muestras de arcilla de la zona de estudio (elaboración propia, 2021).

El procedimiento de muestreo de suelo se realizó simultáneamente a la toma de muestras de agua, siguiendo la norma **NMX-AA-132-SCFI-2016** “Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra” (Véase figura 36).

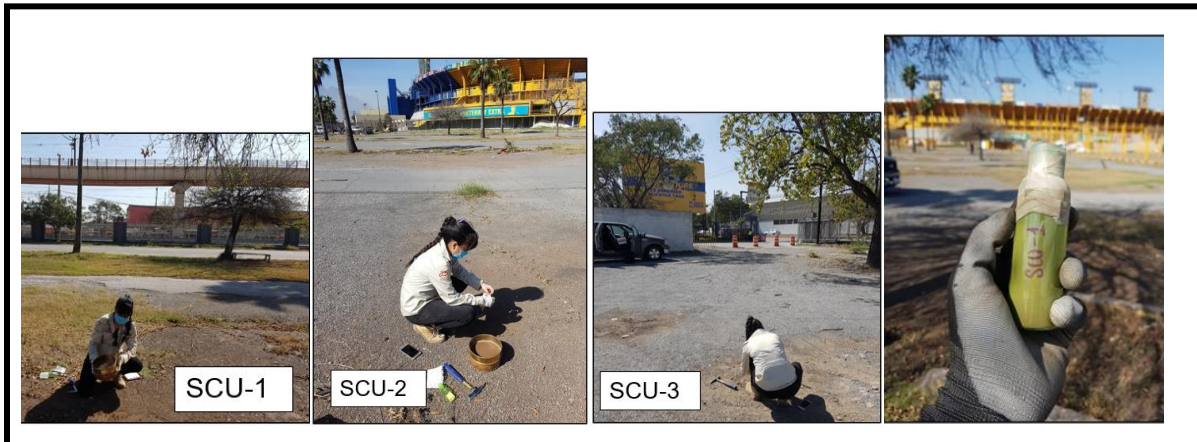


Figura 36. Muestreo de suelo en zona de estudio (elaboración propia, 2021).

Metodología para el muestreo

1. Identificar el lugar de muestreo y preparar los equipos e implementos necesarios.

Previamente se identificó el lugar de la toma de muestras (Véanse figura 25 y tabla 10). El equipo necesario para el muestreo fue el siguiente:

- tamiz #80 (aberturas de 2.38mm)
- charola de fondo
- frasco de plástico con capacidad de 80 ml

- guantes de látex para evitar alteraciones en la muestra
- pica geológica

2. Recolectar las muestras, proceder al llenado de los frascos y cerrar herméticamente.

Con la pica geológica se “raspó” la superficie del suelo, posteriormente se tomó una cantidad que cubriera $\frac{3}{4}$ del tamiz para proceder con el cribado manual, el cual se realizó agitando el tamiz hasta que las partículas finas pasaran la malla. Una vez obtenido el material que paso la malla #80, éste se vertió en el envase de plástico esterilizado y se selló herméticamente.

5. Identificar los frascos con su clave correspondiente, almacenar las muestras y trasladarlas al laboratorio.

Los frascos se identificaron en campo con su clave correspondiente tanto en el frasco como en la tapa.

3.4. Análisis de laboratorio

Una vez realizadas las campañas de muestreo, todos los especímenes fueron enviados al laboratorio certificado “Activation Laboratories Ltd”. (ActLabs/Canadá). Las muestras de suelo y de agua fueron analizadas a través del método de Espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado (ICP-MS).

Las muestras se deben analizar lo antes posible y se deben tomar precauciones para que no se alteren sus características. Se recomienda evitar cambios de temperatura y agitaciones o vibraciones y el almacenamiento debe hacerse en lugar fresco y oscuro (Custodio & LLamas, 1983).

- **Espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado**

Esta técnica se utiliza en la determinación de metales. Dichos límites son mucho más bajos que los de otras técnicas analíticas más convencionales (Barros et al., 2009).

La espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente ICPMS es altamente sensible y capaz de determinar de forma cuantitativa la presencia de casi todos los elementos incluidos en la Tabla Periódica. Se basa en el acoplamiento de un método para generar iones (plasma acoplado inductivamente) y un método para separar y detectar los iones (espectrómetro de masas). La muestra, en forma líquida, es transportada por medio de una bomba peristáltica hasta el sistema nebulizador, donde es transformada en aerosol, gracias a la acción de gas Argón. Dicho aerosol es conducido a la zona de ionización que consiste en un plasma generado al someter un flujo de gas Argón a la acción de un campo magnético oscilante inducido por una corriente de alta frecuencia. En el interior del plasma se pueden llegar a alcanzar temperaturas de hasta 7726.85 C. En estas condiciones, los átomos presentes en la muestra son ionizados. Los iones pasan al interior del filtro cuadripolar a través de una interfaz de vacío creciente. Allí son separados según su relación carga/masa. Cada una de las masas sintonizadas llegan al detector, donde se evalúa su abundancia en la muestra (Cuesta et al., 2020).

3.5. Representación piezométrica y de la evolución de las propiedades del acuífero

- ***Piezometría***

La superficie piezométrica del agua subterránea es definida como el sitio exacto de los puntos que indican la altura piezométrica de cada una de las partes de un acuífero correspondientes a una profundidad determinada. La única forma de conseguir los niveles piezométricos es mediante la medición de los niveles freáticos en un pozo. Las cartas piezométricas facilitan información trascendental tal como la configuración espacial de un acuífero, las direcciones y los gradientes hidráulicos del flujo del agua subterránea y el estado de explotación del agua por actividades humanas (Custodio & LLamas, 1983).

Las cartas piezométricas se elaboran aplicando el método del triángulo hidrológico, dicho método consiste en la interpolación lineal de los niveles piezométricos entre dos puntos de distinta elevación. (Werner, 1996).

Para la representación digital de las cartas piezométricas se hizo uso del software ArcMaps 10.5 aplicando el método de interpolación “Kriging” del Sistema de Información Geográfica (SIG), para la cual se realizó la siguiente metodología:

- 1- Se creó un archivo en Excel con la información de las coordenadas y el nivel piezométrico de cada uno de los pozos registrados.
- 2- Se exportó el archivo de Excel al SIG y se transformó a formato “shape”.
- 3- Se realizó la interpolación con la herramienta “interpolation” y se creó un “ráster”, aplicando el método de interpolación Kriging.
- 4- Una vez realizada la interpolación, se ejecutaron las herramientas del SIG para crear las curvas de nivel del agua subterránea.
- 5- Se dibujaron las líneas representativas de la dirección de flujo y se le dio formato al mapa.

Se calcularon los niveles piezométricos (Véase tabla 21) con el registro de los niveles freáticos reportados en la tabla 19. Finalmente, se realizaron 20 cartas piezométricas (Véanse páginas 83-86) representando la evolución hidrogeológica del acuífero.

Tabla 21. Tabla 21. Tabla 21. Niveles piezométricos desde el año 2016 hasta el 2021 (elaboración propia, 2021).

POZOS	Elaboración propia, 2021					Elaboración propia, 2020.				De León Rodríguez, 2019.					Padilla Morín, et al., 2018.	García González, 2017.				
	MEDICIÓN (02/10/2021)	MEDICIÓN (14/09/2021)	MUESTREO 2 (21/06/2021)	MEDICIÓN (28/05/2021)	MUESTREO 1 (26/01/2021)	MEDICIÓN (27/11/20)	HURACÁN HANNA (31/07/2020)	TORMENTA FERNANDO (06/09/2019)	MUESTREO LICENCIATURA	ORDINARIO (15/05/2019)	ORDINARIO (24/03/2019)	ORDINARIO (15/03/2019)	SEQUIA (04/02/2019)	SEQUIA (16/12/18)	SEQUIA (17/08/2018)	MAYO DEL 2018	MAYO DEL 2017	FEBRERO DEL 2017	JULIO DE 2016	MAYO DEL 2016
PCU- 1	498.82	498.82	498.02	498.77	499.24	499.4	500.76	499.3	498.96	499	498.99	498.96	499.13	499.49	499.07		499.02	499.18	499.07	499
PCU- 2	498.35	498.35	497.5	498.24	498.52	498.52	499.89	499.21		498.23	498.2	498.21	498.25	498.86	498.43	498.23	498.44	498.65	498.43	498.08
PCU- 3	497.68	497.7	497.81	497.55	498.12	498.2	499.61	498.67	497.89	497.93	497.9	497.89	497.98	498.2	497.97	497.98	497.98	498.13	497.97	497.86
PCU- 4	504.45	504.5	504.59	504.37	504.61	504.66	505.2	504.77	505.05	505.32	505.29	505.2	505.23	505.58	505.3	504.65	504.62	504.77	504.58	504.53
PCU- 5	505.49	505.57	505.77	505.72	506.38	506.54	506.76	506.45	505.92	506.64	505.92	505.92	506.18	506.65	507.07	506.6	506.24	506.48	506.29	506.1
PCU- 6	511.04	511.08	511.22	511.16	511.49	511.47	511.55	511.63	511.5	511.34	511.35	511.35	511.39	511.44	511.39	511.45	511.38	511.46	511.44	511.25
PCU- 7	511.85	511.84	511.94	511.82	512.03															

▪ **Mapas temáticos de distribución de parámetros químicos del agua**

Los mapas temáticos son herramientas cartográficas muy prácticas en la comprensión visual-espacial de diferentes fenómenos naturales, estas herramientas son muy utilizadas en los estudios ambientales (S. García, 2017).

Los mapas temáticos de distribución se realizaron sometiendo los resultados arrojados por el laboratorio ActLabs al software ArcMaps 10.5 y aplicando además los programas informáticos Excel y Google Earth. Para digitalizar los datos se ejecutó el comando “Kriging” que es un método geoestadístico, que realiza la autocorrelación entre puntos conocidos. El comando Kriging da como resultado una superficie de predicción.

El resumen de la metodología que se utilizó para la realización de los mapas temáticos a través del SIG fue la siguiente:

- 1- Se ordenaron los datos que serían interpolados en un archivo Excel.
- 2- Se transformaron los archivos de Excel a un formato “shape”.
- 3- Se creó un archivo “shape” del área de estudio la cual tenía el mismo sistema de coordenadas que los datos a interpolar.
- 4- Se utilizó la herramienta “Kriging”, siguiendo cada uno de los pasos que el software requería.
- 5- Se le dio formato a cada uno de los mapas temáticos realizados.

En este caso, los mapas temáticos de distribución fueron utilizados para representar las concentraciones de metales en el agua subterránea.

Al hacer una secuencia de mapas temáticos de distribución digitalizando los metales en diferentes fechas, se puede apreciar la evolución del comportamiento de los contaminantes con el paso del tiempo.

En total, se realizaron 236 mapas temáticos de distribución que representan los 59 metales reportados en los 4 análisis de agua subterránea considerados en esta investigación (Véanse páginas 87 -146). La representación secuencial de dichos mapas muestra la evolución hidrogeoquímica del acuífero.

3.6. Evaluación de los resultados con las normas ambientales

Los metales en agua subterránea (Véanse tablas 22 y 23) y en suelo (Véanse tablas 24 y 25), fueron evaluados según los LMP establecidos por las normativas ambientales nacionales e internacionales, con la finalidad de identificar que metales se encuentran en altas concentraciones y/o por encima de las normativas.

En la figura 27 (Véase página 48), se observa la ubicación de los aprovechamientos hidráulicos muestreados para los análisis del agua. Las concentraciones de metales en agua subterránea fueron variables en los dos muestreos realizados en esta investigación, sin embargo, predominaron en los pozos PCU-1, PCU-3 y PCU-7

PRIMER MUESTREO DEL AGUA SUBTERRÁNEA (26 ENERO 2021)

Tabla 22. LMP en aguas (mg/L) establecidos por normas Nacionales e Internacionales (elaboración propia 2021).

ANÁLISIS (mg/L)	PCU-1	PCU-3	PCU-4	PCU-5	PCU-6	PCU-7	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES									
							NOM-001-ECOL-1996		NOM-127-SSA1-1994	EPA 815-F-00-007	REAL DECRETO 140/2003	OMS, 2006	NCH409/1.OF2005	FAO, 1985	NOM-250-SSA1-2014	OMS, 1995
							RIEGO	URBANO	AGUA POTABLE			RIEGO	AGUA POTABLE			
Na ⁺	112	62.6	41.2	34.3	48.6	47.6	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	1500	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Li ⁺	0.012	0.008	0.006	0.006	0.007	0.006	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	2.5	2.5	N.E.	N.E.
SiO ₂	11.1	10.6	9.9	8.7	10.7	10.2	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
K ⁺	4.14	2.13	1.55	1.93	1.59	1.6	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ca ²⁺	210	166	150	141	161	159	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Be ²⁺	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	N.E.	N.E.	N.E.	0.004	N.E.	N.E.	0.1	0.1	N.E.	N.E.
Mg ²⁺	35.9	31.7	28.7	27	31	29.5	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Al ³⁺	<.004	<.004	<.004	<.004	<.004	0.038	N.E.	N.E.	0.2	N.E.	0.2	N.E.	N.E.	N.E.	0.2	0.2
Sc ³⁺	<.002	<.002	<.002	<.002	<.002	<.002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ti ⁴⁺	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
V ⁵⁺	0.0014	0.0015	0.0014	0.0011	0.0013	0.0015	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	0.1	0.1	N.E.	N.E.
Cr ⁶⁺	<.001	<.001	<.001	0.0011	<.001	<.001	1	0.5	N.E.	N.E.	0.05	N.E.	0.1	0.1	0.05	0.05
Mn ²⁺	0.0017	0.0025	0.0008	0.0004	0.0013	0.004	N.E.	N.E.	0.15	N.E.	0.05	0.4	0.2	0.2	0.015	N.E.
Fe ³⁺	<.02	<.02	<.02	<.02	<.02	0.05	N.E.	N.E.	0.3	N.E.	0.2	N.E.	5	5	0.03	N.E.
Co ³⁺	0.000104	0.000118	0.000078	0.000112	0.00014	0.000186	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	0.05	0.05	N.E.	N.E.
Ni ³⁺	0.0009	0.0008	<.0006	0.0006	0.0007	0.0007	2	2	N.E.	N.E.	0.02	0.07	0.2	0.2	0.02	N.E.
Cu ²⁺	<0.0004	0.0004	<0.0004	0.0005	<0.0004	0.0015	4	4	2	1.3	2	2	0.2	0.2	2	N.E.

Zn ²⁺	0.0033	0.0126	0.0033	0.0038	0.0067	0.0101	10	10	5	N.E.	N.E.	N.E.	2	2	N.E.	N.E.
Ga ³⁺	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ge ⁴⁺	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	0.00002	<0.00002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
As ⁵⁺	0.00036	0.00042	0.00037	0.00032	0.00031	0.00052	0.2	0.1	0.025	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	N.E.	N.E.
Se ⁶⁺	0.0015	0.0014	0.0018	0.0018	0.002	0.0018	N.E.	N.E.	N.E.	0.05	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	N.E.
Rb ⁺	0.00161	0.00168	0.00162	0.00167	0.00159	0.00167	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Sr ²⁺	1.77	1.67	1.55	1.38	1.65	1.59	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Y ³⁺	0.000035	<0.00006	<0.00006	<0.00006	0.000007	0.000058	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Zr ⁴⁺	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	0.00005	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Nb ⁵⁺	<0.00001	<0.00001	<0.00001	<0.00001	<0.00001	<0.00001	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Mo ⁶⁺	0.0012	0.0013	0.0012	0.0016	0.0013	0.0013	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	0.01	0.01	N.E.	N.E.
Ag ⁺	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	0.2	N.E.	N.E.	N.E.
Cd ²⁺	<0.00002	0.00005	<0.00002	<0.00002	0.00005	0.00003	0.2	0.1	0.005	0.005	0.005	0.003	0.01	0.01	0.003	0.003
In ³⁺	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Sn ⁴⁺	0.0005	0.0033	0.0003	0.0003	<.0002	0.0002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Sb ⁵⁺	0.00053	0.00058	0.00069	0.00072	0.00025	0.00053	N.E.	N.E.	N.E.	0.006	0.005	0.005	N.E.	N.E.	0.02	N.E.
Te ⁶⁺	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Cs ⁺	0.000366	0.000522	0.000491	0.000439	0.000373	0.000373	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ba ²⁺	0.032	0.0472	0.0675	0.121	0.0532	0.0693	N.E.	N.E.	0.7	2	N.E.	0.7	4	N.E.	0.7	N.E.
La ³⁺	0.000007	0.000004	0.000005	0.000004	0.000007	0.000049	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ce ⁴⁺	<0.000002	0.000002	0.000005	0.000002	0.000007	0.000132	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Pr ³⁺	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	0.000015	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Nd ³⁺	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	0.000037	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Sm ³⁺	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	0.000008	0.000004	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Eu ³⁺	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Gd ³⁺	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	0.000008	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Tb ³⁺	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Dy ³⁺	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	0.000007	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ho ³⁺	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Er ³⁺	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	0.000003	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Tm ³⁺	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Yb ³⁺	0.000003	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Lu ³⁺	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	0.000003	<0.000002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Hf ⁴⁺	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Hg ²⁺	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004	0.01	0.005	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	N.E.	N.E.	0.001
Ta ⁵⁺	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
W ⁶⁺	<0.00004	<0.00004	<0.00004	<0.00004	<0.00004	0.00024	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ti ³⁺	0.000126	0.000109	0.00009	0.000098	0.000087	0.000105	N.E.	N.E.	N.E.	0.002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Pb ⁴⁺	0.00004	0.00006	0.00005	0.00004	0.00005	0.00021	0.5	0.2	0.01	0.015	0.01	0.01	5	5	N.E.	N.E.
Bi ⁵⁺	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Th ⁴⁺	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	<0.000002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
U ⁶⁺	0.00309	0.00283	0.00258	0.00241	0.0028	0.00261	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.

N.E = No especifica, Concentraciones que sobrepasan los LMP

SEGUNDO MUESTREO DEL AGUA SUBTERRÁNEA (21 JUNIO 2021)

Tabla 23. LMP en aguas (mg/L) establecidos por normas Nacionales e Internacionales (elaboración propia 2021).

ANÁLISIS (mg/L)	PCU-1	PCU-3	PCU-4	PCU-5	PCU-6	PCU-7	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES									
							NOM-001-ECOL-1996		NOM-127-SSA1-199	EPA 815-F-00-007	REAL DECRETO 140/2003	OMS, 2006	NCh409/1.Of2005	FAO, 1985	NOM-250-SSA1-2014	OMS, 1995
							RIEGO	URBANO	AGUA POTABLE			RIEGO		AGUA POTABLE		
Na ⁺	108	63.2	38	30.3	45.6	44.1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	1500	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Li ⁺	0.014	0.009	0.007	0.007	0.008	0.008	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	2.5	2.5	N.E.	N.E.
SiO ₂	10.6	10.3	9.8	10.4	10	10	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
K ⁺	8.18	2.17	3.39	2.13	1.9	1.73	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ca ²⁺	221	168	155	81.7	153	157	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Be ²⁺	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	N.E.	N.E.	N.E.	0.004	N.E.	N.E.	0.1	0.1	N.E.	N.E.
Mg ²⁺	34.1	30.4	27.5	24.4	28	28.2	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Al ³⁺	0.005	0.004	0.002	0.002	0.002	0.002	N.E.	N.E.	0.2	N.E.	0.2	N.E.	N.E.	N.E.	0.2	0.2
Sc ³⁺	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ti ⁴⁺	0.0037	0.0002	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
V ⁵⁺	0.0012	0.0017	0.0015	0.0009	0.0009	0.0017	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	0.1	0.1	N.E.	N.E.
Cr ⁶⁺	0.001	0.001	0.0008	0.0011	0.0008	0.0008	1	0.5	N.E.	N.E.	0.05	N.E.	0.1	0.1	0.05	0.05
Mn ²⁺	0.0081	0.0002	0.0012	0.0013	0.0001	0.0001	N.E.	N.E.	0.15	N.E.	0.05	0.4	0.2	0.2	0.01	N.E.
Fe ³⁺	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	N.E.	N.E.	0.3	N.E.	0.2	N.E.	5	5	0.03	N.E.
Co ³⁺	0.00021	0.00009	0.000077	0.00009	0.000098	0.000105	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	0.05	0.05	N.E.	N.E.
Ni ³⁺	0.0011	0.0008	0.0008	0.0005	0.0005	0.0005	2	2	N.E.	N.E.	0.02	0.07	0.2	0.2	0.02	N.E.
Cu ²⁺	0.0015	0.0015	0.0008	0.0005	0.0006	0.0017	4	4	2	1.3	2	2	0.2	0.2	2	N.E.
Zn ²⁺	0.0116	0.0078	0.011	0.0005	0.0079	0.0132	10	10	5	N.E.	N.E.	N.E.	2	2	N.E.	N.E.
Ga ³⁺	0.00475	0.00625	0.00851	0.0133	0.0069	0.00885	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ge ⁴⁺	0.00002	0.00002	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
As ⁵⁺	0.00039	0.00042	0.00041	0.00034	0.00026	0.00048	0.2	0.1	0.025	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	N.E.	N.E.
Se ⁶⁺	0.0033	0.0022	0.0037	0.0027	0.0035	0.0038	N.E.	N.E.	N.E.	0.05	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	N.E.
Rb ⁺	0.00146	0.0016	0.00163	0.00148	0.00148	0.00192	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Sr ²⁺	1.8	1.7	1.57	1.3	1.62	1.62	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Y ³⁺	0.000077	0.00005	0.000053	0.000028	0.000029	0.000028	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Zr ⁴⁺	0.00005	0.00002	0.00002	0.00001	0.00001	0.00001	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Nb ⁵⁺	0.00001	0.00001	0.000005	0.000005	0.000005	0.000005	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Mo ⁶⁺	0.0013	0.0013	0.0013	0.0017	0.0013	0.0015	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	0.01	0.01	N.E.	N.E.

Ag ⁺	0.0004	0.0004	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	0.2	N.E.	N.E.	N.E.
Cd ²⁺	0.00006	0.00002	0.00002	0.00001	0.00005	0.00009	0.2	0.1	0.005	0.005	0.005	0.003	0.01	0.01	0.003	0.003
In ³⁺	0.000015	0.000002	0.000005	0.000001	0.000002	0.000001	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Sn ⁴⁺	0.0029	0.0003	0.0008	0.0003	0.0003	0.0001	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Sb ⁵⁺	0.00006	0.00002	0.00002	0.00001	0.00002	0.00005	N.E.	N.E.	N.E.	0.006	0.005	0.005	N.E.	N.E.	0.02	N.E.
Te ⁶⁺	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Cs ⁺	0.000423	0.000444	0.000431	0.000357	0.000208	0.000388	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ba ²⁺	0.0353	0.0445	0.0631	0.0983	0.0502	0.0645	N.E.	N.E.	0.7	2	N.E.	0.7	4	N.E.	0.7	N.E.
La ³⁺	0.000003	0.000013	0.000002	0.000001	0.000001	0.000001	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ce ⁴⁺	0.000006	0.000002	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Pr ³⁺	0.000002	0.000002	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Nd ³⁺	0.000002	0.000002	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Sm ³⁺	0.000003	0.000002	0.000001	0.000003	0.000001	0.000002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Eu ³⁺	0.00001	0.000014	0.000019	0.000031	0.000011	0.000016	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Gd ³⁺	0.000002	0.000002	0.000001	0.000001	0.000002	0.000004	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Tb ³⁺	0.000002	0.000002	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Dy ³⁺	0.000002	0.000002	0.000001	0.000001	0.000001	0.000003	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ho ³⁺	0.000002	0.000002	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Er ³⁺	0.000002	0.000002	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Tm ³⁺	0.000003	0.000002	0.000003	0.000002	0.000001	0.000002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Yb ³⁺	0.000007	0.000005	0.000001	0.000001	0.000001	0.000003	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Lu ³⁺	0.000002	0.000002	0.000002	0.000001	0.000001	0.000001	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Hf ⁴⁺	0.000003	0.000004	0.000001	0.000002	0.000001	0.000003	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Hg ²⁺	0.0004	0.0004	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.01	0.005	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	N.E.	N.E.	0.001
Ta ⁵⁺	0.000002	0.000002	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
W ⁶⁺	0.00059	0.00028	0.00006	0.00004	0.00003	0.00003	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Tl ³⁺	0.000109	0.000065	0.000057	0.00004	0.000044	0.000061	N.E.	N.E.	N.E.	0.002	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Pb ⁴⁺	0.00084	0.00088	0.00035	0.00018	0.00039	0.00047	0.5	0.2	0.01	0.015	0.01	0.01	5	5	N.E.	N.E.
Bi ⁵⁺	0.0006	0.0006	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Th ⁴⁺	0.000002	0.000002	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
U ⁶⁺	0.00293	0.00275	0.00251	0.00211	0.00254	0.00262	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.

N.E = No especifica, Concentraciones cercanas a los LMP,

En la figura 27 (Véase página 48), se observa la ubicación de los sitios de muestreo de suelos. La mayor concentración de metales fue en sitio SCU-1, ubicado al suroeste de la zona de estudio colindando con la industria del acero TERNIUM, los sitios de muestreo SCU-2 y SCU-3 también presentaron altas concentraciones

de metales, sin embargo, la zona más crítica fue al suroeste (SCU-1) para ambos muestreos.

PRIMER MUESTREO DEL SUELO (26 ENERO 2021)

Tabla 24. LMP en suelos (mg/kg) establecidos por normas Nacionales e Internacionales (elaboración propia, 2021).

ANÁLISIS (mg/kg)	SCU-1	SCU-2	SCU-3	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES						
				147-SEMARNAT-2004		FAO-2003				OPS-1995
				AGRICOLA RESIDENCIAL COMERCIAL	INDUSTRIAL	AGRICOLA	RESIDENCIAL	COMERCIAL	INDUSTRIAL	AGRICOLA
S ⁶⁺	<10000	<10000	<10000	N.E.	N.E.	500	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
P ⁵⁺	1190	890	720	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Li ⁺	6.2	7.2	5.7	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	2.5
Be ²⁺	0.7	0.8	0.4	150	1900	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	0.1
Na ⁺	360	390	160	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
K ⁺	2000	1000	1600	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ca ²⁺	123000	125000	216000	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ti ⁴⁺	660	710	220	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
B ³⁺	17	14	8	N.E.	N.E.	2	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Mg ²⁺	8300	8500	6000	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Al ³⁺	13400	12900	8600	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	5
Bj ⁵⁺	1.63	2.04	0.56	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Sc ³⁺	2.7	2.4	1.5	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
V ⁵⁺	337	323	45	78	1000	130	130	130	130	0.1
Cr ⁶⁺	166	152	47	280	510	65	65	90	90	0.1
Mn ²⁺	1830	1850	525	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	0.2
Fe ³⁺	205000	209000	32000	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	5
Co ³⁺	15.8	16.5	4.9	N.E.	N.E.	40	50	300	300	0.05
Ni ³⁺	55.5	58.3	13.7	1600	20000	50	100	100	100	0.2
Cu ²⁺	74.2	74.4	31.9	N.E.	N.E.	63	63	91	91	0.2
Zn ²⁺	> 5000	> 5000	872	N.E.	N.E.	200	200	380	380	2
Ga ³⁺	4.71	3.22	1.27	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ge ⁴⁺	0.4	0.3	< 0.1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
As ⁵⁺	15.8	13.2	6.9	22	260	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	0.1
Rb ⁺	10.2	5.9	8.9	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Sr ²⁺	201	222	317	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Y ³⁺	8.51	9.59	6.89	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Zr ⁴⁺	5.6	10.4	0.7	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Nb ⁵⁺	6.1	6.6	2.7	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.

Mo ⁶⁺	5.37	5.58	1.95	N.E.	N.E.	5	10	40	40	0.01
Ag ⁺	0.759	1.07	0.341	390	5100	20	20	40	40	N.E.
In ³⁺	0.06	0.08	0.02	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Sn ⁴⁺	7.43	8.71	3.37	N.E.	N.E.	5	50	300	300	N.E.
Sb ⁵⁺	4.71	5.15	2.39	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Te ⁶⁺	0.13	0.12	0.06	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Cs ⁺	0.99	0.61	0.92	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ba ²⁺	324	390	164	5400	67000	750	500	2000	2000	N.E.
La ³⁺	16.4	23.3	9	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ce ⁴⁺	25.3	33.5	14.4	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Cd ²⁺	4.57	5.23	2.02	N.E.	N.E.	2	5	10	10	0.01
Pr ³⁺	2.7	3.3	1.8	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Nd ³⁺	10.1	11.9	7.02	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Sm ³⁺	1.7	2	1.4	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Se ⁶⁺	1.7	1.6	1.2	390	5100	2	3	10	10	0.02
Eu ³⁺	0.3	0.3	0.2	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Gd ³⁺	1.6	1.8	1.2	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Tb ³⁺	0.2	0.3	0.2	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Dy ³⁺	1.3	1.4	1.1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ho ³⁺	0.3	0.3	0.2	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Er ³⁺	0.7	0.7	0.5	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Tm ³⁺	< 0.1	0.1	< 0.1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Yb ³⁺	0.7	0.8	0.5	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Lu ³⁺	< 0.1	0.1	< 0.1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Hf ⁴⁺	< 0.1	0.1	< 0.1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ta ⁵⁺	< 0.05	< 0.05	< 0.05	5.2	67	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
W ⁶⁺	2.3	2.5	0.7	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Re ⁷⁺	< 0.001	0.001	< 0.001	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Au ³⁺	4.3	11.2	1.3	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Tl ³⁺	0.15	0.12	0.13	N.E.	N.E.	1	1	1	1	N.E.
Pb ⁴⁺	280	297	119	400	800	100	100	150	150	5
Th ⁴⁺	2.1	3.1	1.1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
U ⁶⁺	0.9	1.1	0.5	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Hg ²⁺	390	380	110	23	310	0.8	2	10	10	N.E.

N.E = No específica, Concentraciones que sobrepasan los LMP,

SEGUNDO MUESTREO DEL SUELO (21 JUNIO 2021)

Tabla 25. LMP en suelos (mg/kg) establecidos por normas Nacionales e Internacionales (elaboración propia, 2021).

ANÁLISIS (mg/kg)	SCU-1	SCU-2	SCU-3	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES						
				147-SEMARNAT-2004		FAO-2003				OPS-1995
				AGRICOLA RESIDENCIAL COMERCIAL	INDUSTRIAL	AGRICOLA	RESIDENCIAL	COMERCIAL	INDUSTRIAL	AGRICOLA
S ⁶⁺	10000	10000	10000	N.E.	N.E.	500	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
P ⁵⁺	840	840	920	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Li ⁺	6.1	6.4	6	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	2.5
Be ²⁺	0.7	0.8	0.7	150	1900	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	0.1
Na ⁺	410	300	210	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
K ⁺	1900	1900	1300	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ca ²⁺	93700	96100	150000	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ti ⁴⁺	620	560	160	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
B ³⁺	20	23	12	N.E.	N.E.	2	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Mg ²⁺	7400	6000	4700	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Al ³⁺	11500	11900	7200	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	5
Bj ⁵⁺	1.71	1.8	0.6	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Sc ³⁺	1.9	2	0.6	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
V ⁵⁺	311	277	59	78	1000	130	130	130	130	0.1
Cr ⁶⁺	139	107	52	280	510	65	65	90	90	0.1
Mn ²⁺	1630	1310	656	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	0.2
Fe ³⁺	194000	175000	40700	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	5
Co ³⁺	14.1	14.2	4.4	N.E.	N.E.	40	50	300	300	0.05
Ni ³⁺	54.5	51.5	14	1600	20000	50	100	100	100	0.2
Cu ²⁺	74.6	61	28.4	N.E.	N.E.	63	63	91	91	0.2
Zn ²⁺	> 5000	4890	1110	N.E.	N.E.	200	200	380	380	2
Ga ³⁺	< 0.02	< 0.02	< 0.02	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ge ⁴⁺	< 0.1	< 0.1	< 0.1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
As ⁵⁺	14.6	13.2	4.6	22	260	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	0.1
Rb ⁺	8.5	10.1	5	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Sr ²⁺	189	183	310	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Y ³⁺	7.36	8.01	5.69	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Zr ⁴⁺	6.7	3.1	1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Nb ⁵⁺	2.5	2.2	1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Mo ⁶⁺	5.62	4.59	2.05	N.E.	N.E.	5	10	40	40	0.01
Ag ⁺	0.898	0.768	0.341	390	5100	20	20	40	40	N.E.
In ³⁺	0.05	0.05	< 0.02	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Sn ⁴⁺	7.29	7.65	3.71	N.E.	N.E.	5	50	300	300	N.E.

Sb ⁵⁺	4.74	4.89	1.9	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Te ⁶⁺	0.13	0.1	0.05	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Cs ⁺	0.86	1	0.42	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ba ²⁺	342	346	200	5400	67000	750	500	2000	2000	N.E.
La ³⁺	15.9	18.9	12.6	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ce ⁴⁺	22.3	25.6	18.1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Cd ²⁺	4.14	3.72	1.92	N.E.	N.E.	2	5	10	10	0.01
Pr ³⁺	2.4	2.8	1.9	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Nd ³⁺	8.96	9.8	7.18	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Sm ³⁺	1.4	1.9	1.3	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Se ⁶⁺	1.3	1.1	1	390	5100	2	3	10	10	0.02
Eu ³⁺	0.2	0.3	0.2	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Gd ³⁺	1.5	1.7	1.4	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Tb ³⁺	0.2	0.2	0.2	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Dy ³⁺	1.2	1.4	1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ho ³⁺	0.2	0.3	0.2	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Er ³⁺	0.7	0.8	0.5	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Tm ³⁺	< 0.1	< 0.1	< 0.1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Yb ³⁺	0.6	0.7	0.4	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Lu ³⁺	< 0.1	< 0.1	< 0.1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Hf ⁴⁺	< 0.1	< 0.1	< 0.1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Ta ⁵⁺	< 0.05	< 0.05	< 0.05	5.2	67	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
W ⁶⁺	2.9	2.2	0.9	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Re ⁷⁺	0.002	0.001	0.001	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Au ³⁺	3.6	53.1	3.1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Tl ³⁺	0.13	0.15	0.09	N.E.	N.E.	1	1	1	1	N.E.
Pb ⁴⁺	264	239	129	400	800	100	100	150	150	5
Th ⁴⁺	2.3	2.1	0.4	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
U ⁶⁺	0.9	0.8	0.5	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Hg ²⁺	510	380	80	23	310	0.8	2	10	10	N.E.

N.E = No específica, Concentraciones que sobrepasan los LMP,

3.7. Relación de los contaminantes con los componentes de las estructuras

El acuífero que se analizó en esta investigación se encuentra principalmente contaminado por metales debido a la zona industrial en la que se localiza, Según Calleja (1966), los iones Fe³⁺, Ni³⁺, Sn⁴⁺ y Pb⁴⁺ aumentan la acidez del agua y a su vez el agua ácida perjudica a las estructuras de concreto, en el agua subterránea analizada se encontraron concentraciones de estos iones metálicos y algunos otros, los cuales, pudieran estar corroyendo las zapatas de las cimentaciones de los edificios universitarios en estudio. Sin embargo, el pH del agua subterránea

determinará si su acidez se vio alterada o no, debido a los iones metálicos que contiene.

En general, el cemento portland no tiene buena resistencia a los ácidos, no obstante, puede tolerar algunos ácidos débiles, particularmente si hay exposición ocasional (ACI 201, 2001).

Los ácidos atacan las bases y las sales básicas formadas por la hidratación del cemento, deteriorándolo por la formación de sales solubles y procesos de disolución que eliminan el hidróxido de sodio (NaOH) (González de la Cotera, 1991).

El concreto a base de cemento portland resiste a la mayoría de los medios ambientes a los que se pueda encontrar expuesto; sin embargo, en algunas ocasiones el concreto entra en contacto con sustancias que pueden atacar y causar deterioración. El efecto del SO_4^{2-} y del Cl^- es perjudicial para el concreto (Kosmatka, 2004).

En los datos históricos analizados se encontró que los Cl^- y SO_4^{2-} del acuífero en estudio sobrepasan los LMP con altas cantidades en los pozos PCU-1 y PCU-3 (Véase tabla 26) .

Tabla 26. Cloruros y sulfatos en mg/L. Adaptada de (García 2017).

ANÁLISIS (mg/L)	PCU-1	PCU-3	PCU-4	PCU-5	PCU-6	PCU-7	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES					
							NOM-001-ECOL		NOM-127-SSAI-1994	EPA-815-F-00-007	REAL DECRETO 140/2003	OMS, 2006
							RIEGO	URBANO				
Cl^-	815.3	730.3	188.0	124.8	182.6	175.5	N.E	N.E	250.0	N.E	250.0	N.E
SO_4^{2-}	462.5	462.5	143.7	120.0	144.0	90.0	N.E	N.E	400.0	N.E	250.0	400.0

Concentraciones que sobrepasan los LMP

Para determinar la afectación de los Cl^- y SO_4^{2-} hacia las cimentaciones de las estructuras en estudio, se aplicaron las normativas tanto nacionales como internacionales: NMX-C-403-ONNCCE-1999, ACI 201 y ACI 318 (página 154).

CAPÍTULO 4 (ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS)

Conductividad

La conductividad se define como la capacidad de una solución para conducir electricidad. Los iones, pueden transportar una corriente eléctrica a través de soluciones de agua. Los iones provienen primariamente de los ácidos, así como de las sales (Rodríguez, 2009).

Jenkins et al., 1983, en su libro reportaron una clasificación de la calidad del agua de irrigación dependiendo de su conductividad (Véase tabla 27).

La conductividad se encuentra en el primer paso de control de calidad y se le establece un valor recomendado de 100 – 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para el agua potable (APHA, 1995). Mientras que la OMS establece para agua potable un LMP de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Tabla 27. Clasificación de aguas naturales por su conductividad eléctrica (APHA, 1995)

Grado	Conductividad máxima en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C
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 de la salinidad del agua por efecto, afecta a gravedad el ecosistema fluvial, pudiendo provocar una significativa disminución de la biodiversidad. El medir la conductividad del agua tiene distintas aplicaciones en aguas naturales, una de las más importantes es la evaluación de la concentración de minerales disueltos en aguas naturales y residuales (ECOFLUIDOS, 2012).

La conductividad eléctrica en todas las mediciones realizadas se mantuvo en niveles superiores a 4900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, superando por mucho los LMP establecidos por las diferentes normativas antes mencionadas que establecen un LMP máximo de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para agua potable y para el caso de agua de irrigación para valores mayores de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se considera agua inservible.

Durante las mediciones realizadas correspondientes al huracán Hanna se obtuvo un descenso en la conductividad eléctrica (Véase figura 37), lo cual se atribuye a dicho evento extraordinario. La única excepción donde la conductividad

fue menor (1358 $\mu\text{S}/\text{cm}$) corresponde a la medición 1 posterior a la tormenta Fernando en el PCU-5, dicha irregularidad se puede atribuir al evento extraordinario que generó mezclas de aguas reduciendo los valores de la conductividad. Cabe mencionar que a pesar de la presencia de los fenómenos extraordinarios (huracán Hanna y tormenta Fernando), la conductividad en general sigue siendo elevada (hasta 601% arriba del LMP establecido por la OMS para agua potable). Los elevados valores de la conductividad eléctrica podrían asociarse a la geología de la zona en estudio debido a los estratos de lentes de calizas, dichos estratos podrían estar aumentando las sales del acuífero y con ello su conductividad eléctrica. Además, los altos contenidos de iones metálicos del agua subterránea también podrían estar influyendo.

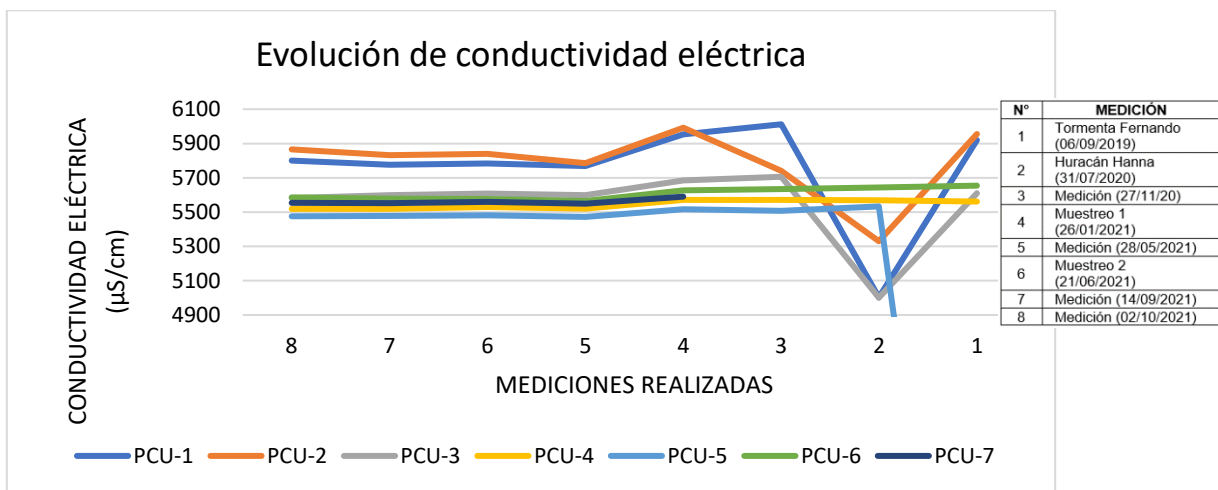


Figura 37. Gráfico de conductividad eléctrica en las mediciones realizadas (elaboración propia, 2021).

Temperatura

Las aguas subterráneas tienen una temperatura muy poco variable, y responde a la media anual de las temperaturas atmosféricas del lugar (Custodio & LLamas, 1983)

También, la temperatura del agua subterránea es influenciada por las características del terreno en el que se traslada, pudiendo ser influenciada, por la naturaleza de las rocas en función de la profundidad (Catalán, 1981).

La medición de la temperatura forma parte de la caracterización física de las muestras de agua. Durante las 8 campañas de medición de niveles freáticos la

temperatura oscilo entre el intervalo de 24.8 a 27.1 °C en los distintos aprovechamientos hidráulicos, cabe mencionar que estos valores se encuentran muy próximos a la temperatura ambiente, debido a que el agua subterránea se encuentra interactuando con las variaciones climatológicas.

La figura 36, representa el comportamiento de la temperatura en los 8 muestreos realizados durante esta investigación. Aunque las temperaturas en general no fueron muy variables, se logra apreciar un ascenso en la temperatura en los valores reportados de la medición #2 que corresponde al evento extraordinario (Huracán Hanna). A dicho evento extraordinario se le puede atribuir las variaciones en la temperatura debido a la mezcla de aguas que produce dicho suceso. Se logra apreciar que los aprovechamientos hidráulicos que presentan mayor temperatura son los pozos PCU-1 y PCU-3.

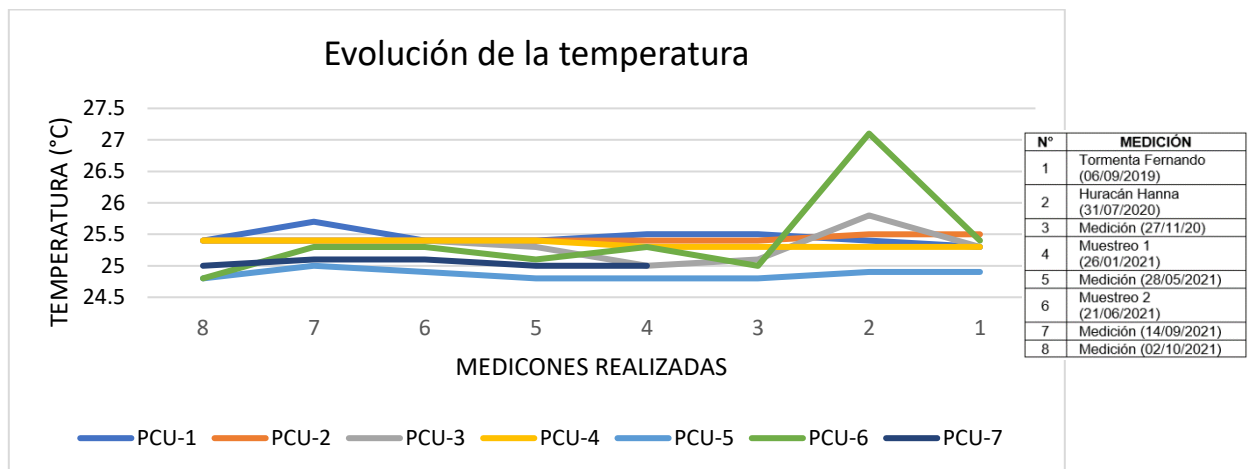


Figura 38. temperaturas en las mediciones realizadas (elaboración propia, 2021).

Potencial de Hidrógeno (pH)

El pH es definido como el logaritmo de la concentración de iones hidrógeno. La escala de pH va desde el 0 (muy ácido) al 14 (muy alcalino), estando el valor de 7 en la neutralidad exacta a 25°C. El pH en las aguas puede variar entre 4.5 y 8.5 (Rodríguez, 2009).

Este parámetro de caracterización física del agua, se encuentra en el primer nivel de control de calidad y se le establece un valor recomendado mínimo de 6.5 y un máximo admisible de 8.5 (Ministerio de Salud, 2005).

Un agua con un pH < 7.0 se considera ácida y con un pH > 7.0 se considera básica o alcalina. El rango normal de pH en agua superficial es de 6.5 a 8.5 mientras que para las aguas subterráneas es de 6.0 a 8.5. Es necesario realizar la medición del pH para determinar la corrosividad del agua. El pH del agua suele descender cuando se expone al CO₂, debido a la asociación de pH con los gases atmosféricos y la temperatura. En general, un agua con un pH bajo (< 6.5) podría ser ácida y corrosiva; por lo tanto, podría disolver iones metálicos, tales como: Fe³⁺, Mn²⁺, Cu²⁺, Pb⁴⁺ y Zn²⁺ (PureWater, 2019).

En la figura 39, se representa el pH correspondiente a los dos muestreos realizados durante esta investigación. Se puede observar que el pH aumentó ligeramente para el segundo muestreo, esto podría adjudicarse a que durante el primer muestreo los niveles de agua que transportaba el acuífero en estudio eran más elevados que en el caso del muestreo dos. Sin embargo, el pH se mantuvo dentro de los valores recomendados y muy cercano a la neutralidad en todas las mediciones reportadas. El pH es un factor de suma importancia a considerar para la agresión de las aguas subterráneas hacia las estructuras de concreto y acero, ya que las aguas ácidas agreden a dichos materiales acelerando la corrosión y degradación, sin embargo, en ningún caso se encontraron valores de pH con la acidez necesaria para considerarse un ambiente agresivo para las cimentaciones (pH < 6.5) (Véase Tabla 4 en la página 42).

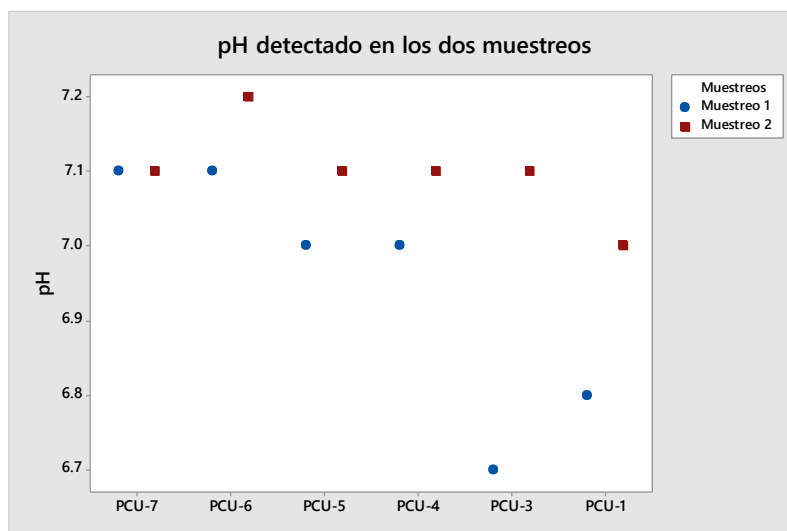


Figura 39. Niveles de pH (elaboración propia, 2021).

Piezometría

Los niveles piezométricos más elevados obtenidos en esta investigación fueron los posteriores al huracán Hanna, como se muestra en la figura 40. No se tienen registros más elevados hasta el momento a excepción de los registrados posterior al Huracán Alex en el 2010 (Véase figura 156). Las diferencias más significativas entre los niveles piezométricos se dan en los pozos PCU-1, PCU-2 y PCU-3, que son los aprovechamientos hidráulicos que se encuentran en dirección noreste en la zona de estudio. El pozo PCU-7 en su medición de enero 2021 ha mostrado el nivel más elevado hasta el momento con un valor de 512.03 msnm.

Con el registro de los niveles piezométricos se determinó si el acuífero tiene o no contacto con las cimentaciones de las edificaciones en estudio (véase figura 156 en página 152).

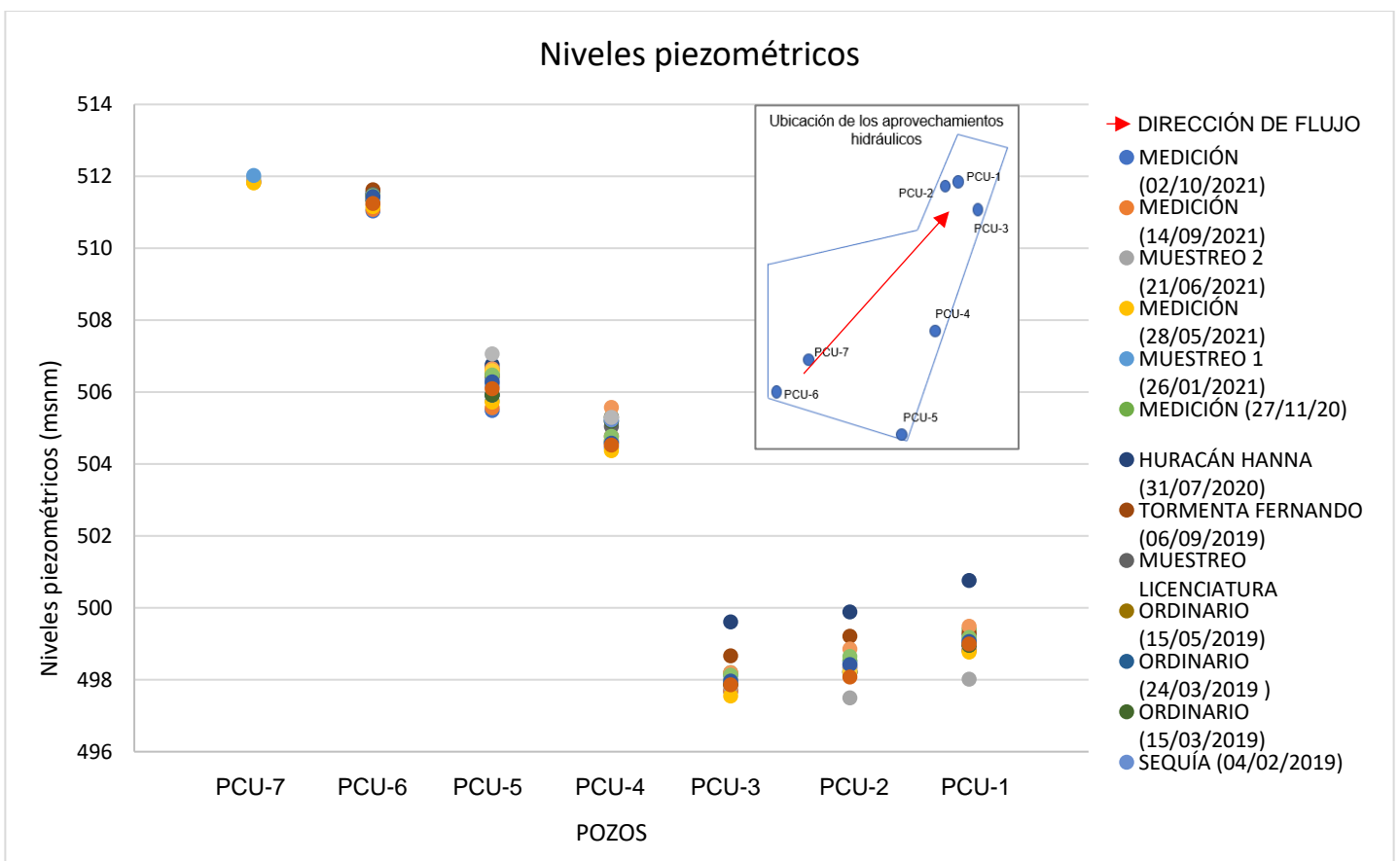


Figura 40. Registro de Niveles Piezométricos (elaboración propia, 2021).

A continuación, se anexan las cartas piezométricas que representan la evolución del acuífero con el paso de los años desde el 2016 hasta el 2021, en las distintas épocas del año (sequía, ordinario y extraordinario).

Se observa que el acuífero está en constante movimiento. Por lo cual, se considera un acuífero dinámico (Véanse páginas 83-86). La dinámica del acuífero provoca que los contaminantes presentes en el agua subterránea estén en constante movimiento, concentrándose en distintos puntos a lo largo del tiempo.

Cartas piezométricas desde el año 2016 hasta el año 2021

Investigaciones anteriores

Mayo 2016 (García, 2017)

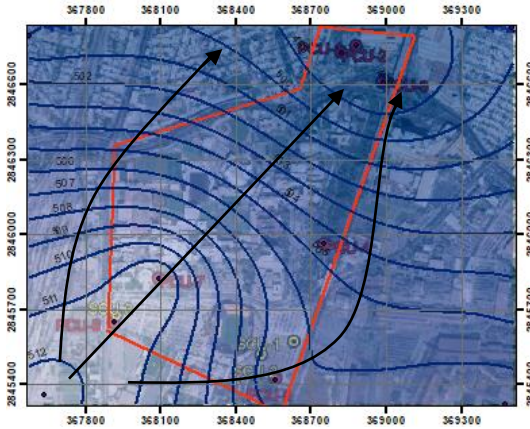


Figura 41. Piezometría mayo 2016 (elaboración propia, 2021).

Julio 2016 (García, 2017)

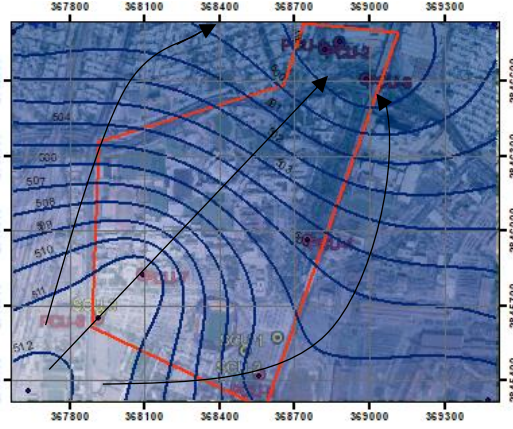


Figura 42. Piezometría julio 2016 (elaboración propia 2021).



Febrero 2017 (García, 2017)

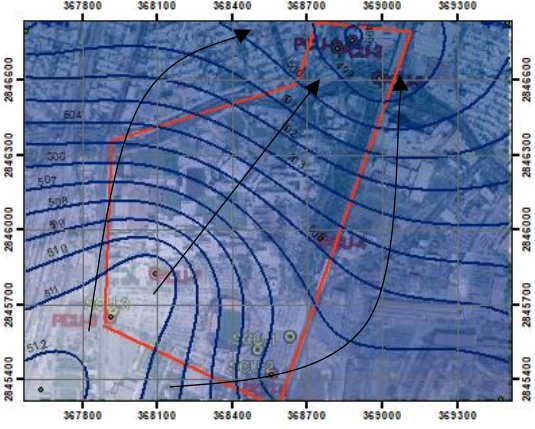


Figura 43. Piezometría febrero 2017 (elaboración propia 2021).

Mayo 2017 (García, 2017)

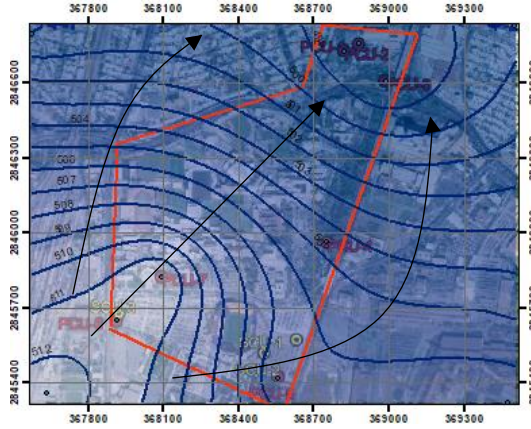


Figura 44. Piezometría mayo 2017 (elaboración propia 2021).



Mayo 2018 (Mora., et al, 2018)

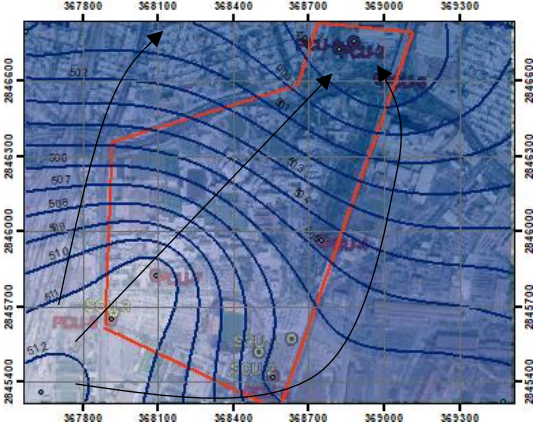


Figura 45. Piezometría mayo 2018 (elaboración propia 2021).

Agosto 2018 (De León, 2019)

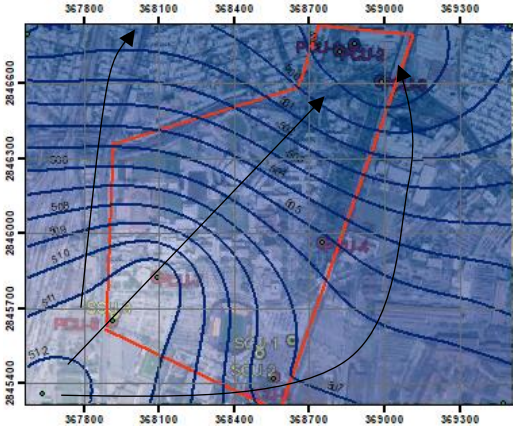


Figura 46. Piezometría agosto 2018 (elaboración propia 2021).



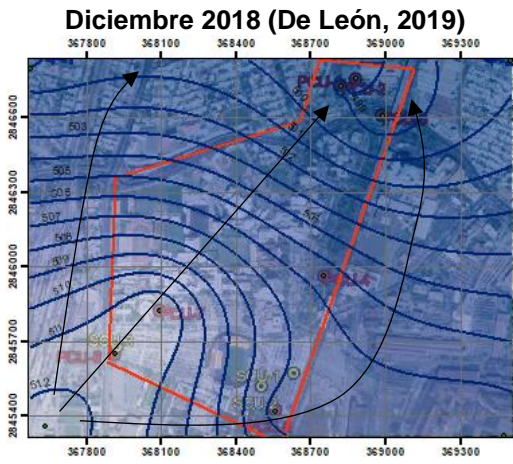


Figura 47. Piezometría diciembre 2018 (elaboración propia 2021).

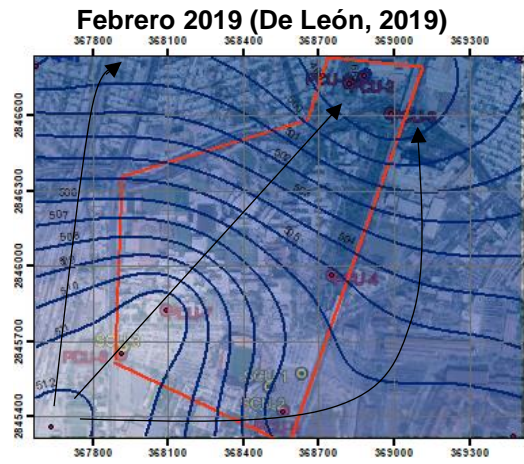


Figura 48. Piezometría febrero 2019 (elaboración propia 2021).

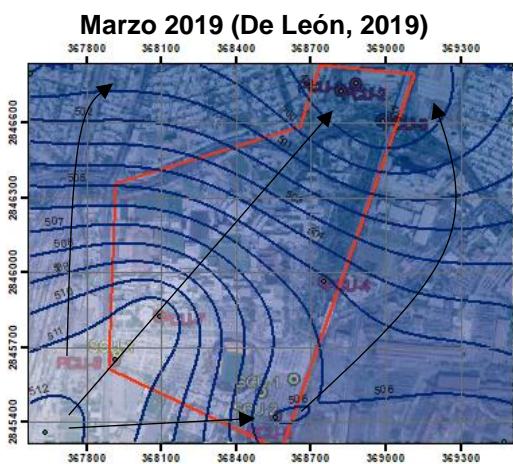


Figura 49. Piezometría marzo 2019 (elaboración propia 2021).

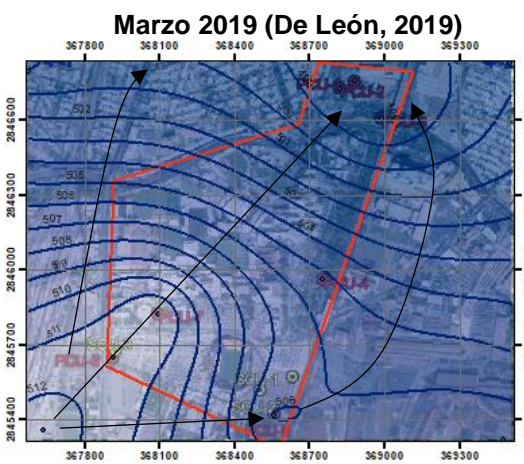


Figura 50. Piezometría marzo 2019 (elaboración propia 2021).

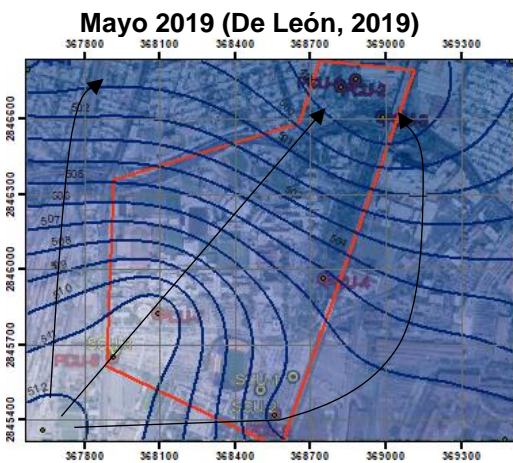


Figura 51. Piezometría mayo 2019 (elaboración propia 2021).

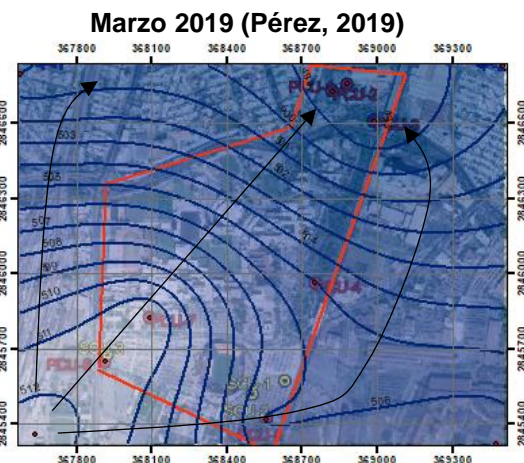


Figura 52. Piezometría marzo 2019 (elaboración propia 2021).



Investigación actual

Septiembre 2019 (Tormenta Fernando)

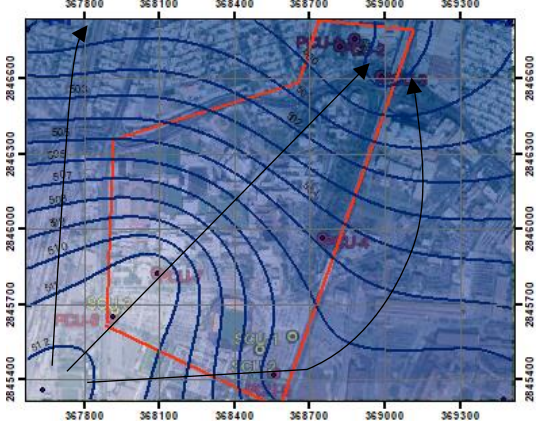


Figura 53. Piezometría septiembre 2019 (elaboración propia 2021).

Julio 2019 (Tormenta Hanna)

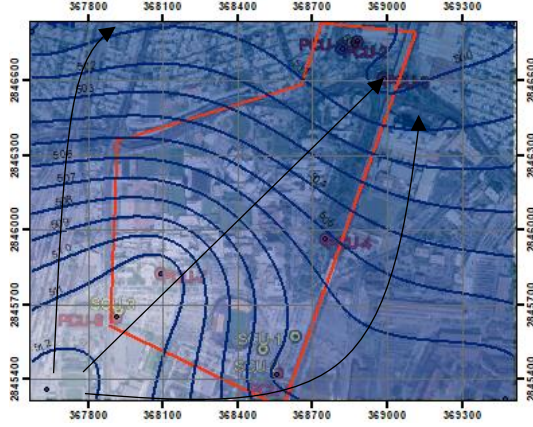
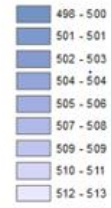


Figura 54. Piezometría julio 2019 (elaboración propia 2021).



- Pozos (clave)
- Área de estudio
- dirección de flujo
- Isoíneas piezométricas, @1.0m

Alturas piezométricas (msnm):



Noviembre 2020

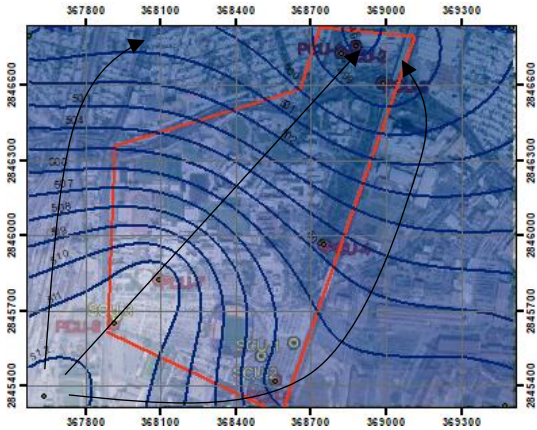


Figura 55. Piezometría noviembre 2020 (elaboración propia 2021).

Enero 2021

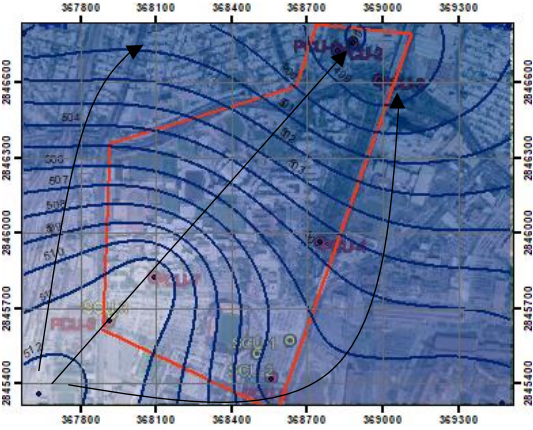
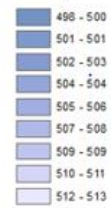


Figura 56. Piezometría enero 2021 (elaboración propia 2021).



- Pozos (clave)
- Área de estudio
- dirección de flujo
- Isoíneas piezométricas, @1.0m

Alturas piezométricas (msnm):



Mayo 2021

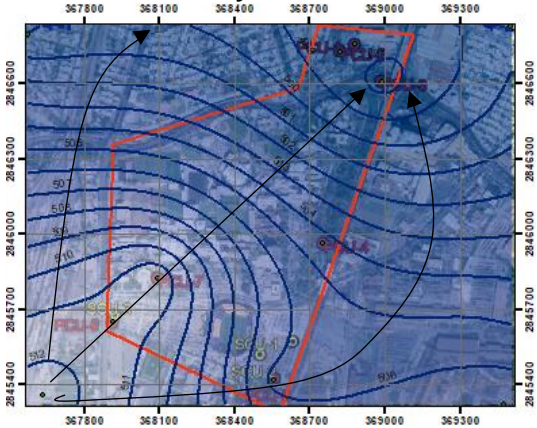


Figura 57. Piezometría mayo 2021 (elaboración propia 2021).

Junio 2021

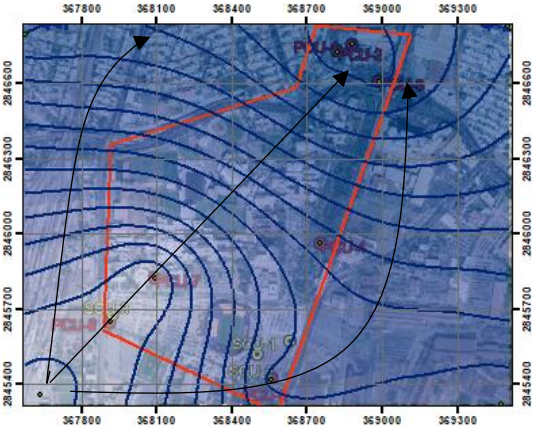
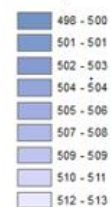


Figura 58. Piezometría junio 2021 (elaboración propia 2021).



- Pozos (clave)
- Área de estudio
- dirección de flujo
- Isoíneas piezométricas, @1.0m

Alturas piezométricas (msnm):



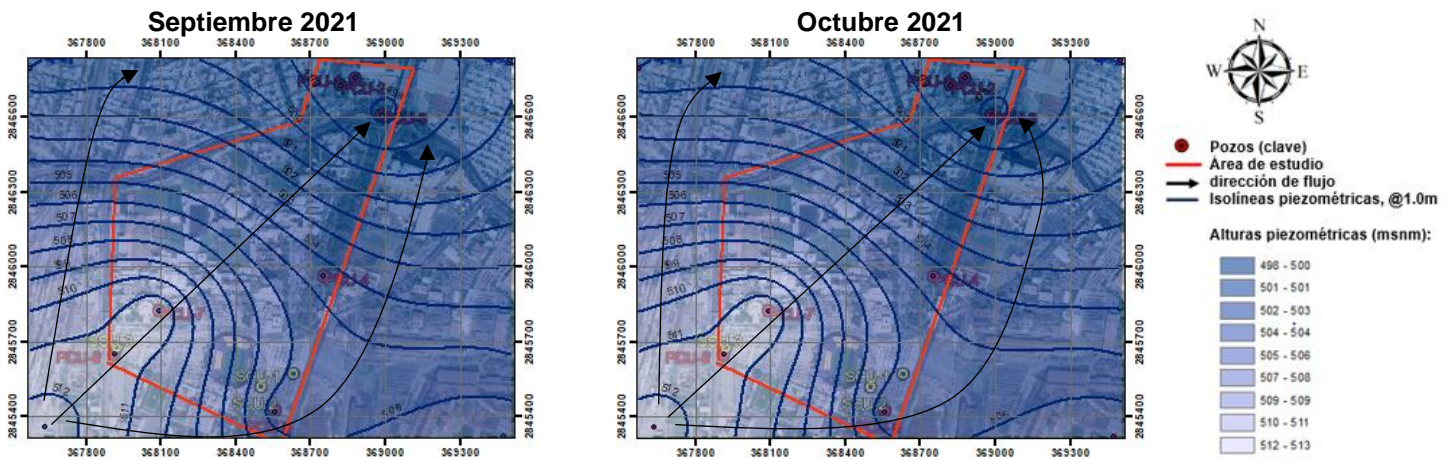


Figura 59. Piezometría septiembre 2021 (elaboración propia 2021).

Figura 60. Piezometría octubre 2021 (elaboración propia 2021).

Los niveles piezométricos variaron desde 497 msnm hasta 512.3 msnm y la dirección preferencial del flujo subterráneo en todos los casos fue de dirección suroeste a noreste partiendo del suroeste (PCU-6), donde, se presentan las mayores alturas piezométricas, las cuales van disminuyendo hacia el suroeste. Se puede observar que hay una diferencia de aproximadamente 14 metros en los niveles piezométricos para todas las mediciones.

La dirección de flujo influye en las concentraciones de los contaminantes, al ir en dirección suroeste a noreste, los contaminantes deberían presentarse en mayores cantidades en el noreste ya que es hacia ese sentido al que se dirige el flujo. La conductividad eléctrica y la temperatura presentaron sus valores más elevados al noreste (PCU-1 y PCU-3).

Mapas temáticos de distribución de parámetros químicos del agua

A continuación, se anexan los mapas temáticos de distribución de los 59 metales analizados, que representan la evolución de la hidrogeoquímica del acuífero con el paso de los años desde el 2017 hasta el 2021.

En todos los mapas se observa que las concentraciones de metales en el acuífero están en constante movimiento, esto puede ser debido a razones tanto naturales como antropogénicas.

En los muestreos analizados durante la presente investigación no se encontró que ningún ion metálico sobrepasara los LMP a excepción del Fe^{3+} .

1. Al³⁺

El ion Al³⁺ puede encontrarse de manera natural en concentraciones de hasta 2mg/L. La minería y el procesamiento de minerales de Al³⁺, generan cantidades altas de Al³⁺ en el ambiente (ECOFLUIDOS, 2012). Respirar altas cantidades de polvo de Al³⁺ puede desarrollar problemas respiratorios (ATSDR, 2021). Las concentraciones de Aluminio fueron variables durante los distintos muestreos (Véase figura 63). Los niveles más elevados detectados se localizaron en los pozos (PCU-4, PCU-5 y PCU-6) (Véase figura 61).

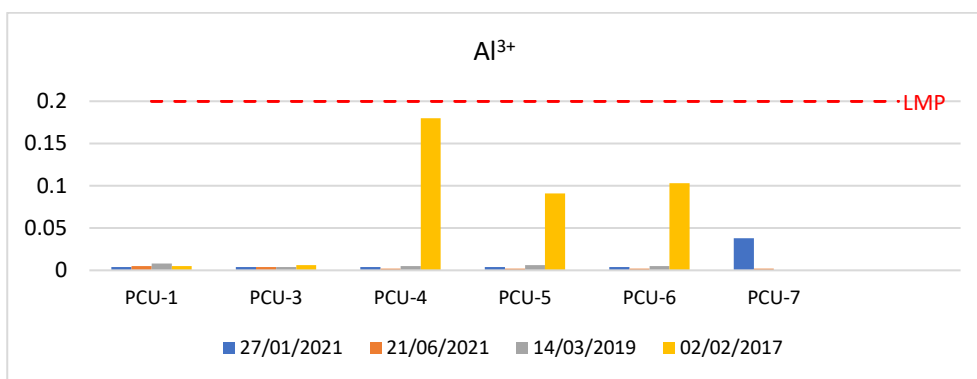


Figura 61. Concentraciones de Al³⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

2. Sb⁵⁺

El Sb⁵⁺ se encuentra en agua naturales con concentraciones inferiores a 10µg/L. El Sb⁵⁺ no es un elemento abundante en la naturaleza; raras veces se encuentra en forma natural (ECOFLUIDOS, 2012). La exposición a Sb⁵⁺ puede causar irritación de ojos, piel y pulmones (ATSDR, 2021). Las concentraciones de Sb⁵⁺ se desplazaron durante los distintos muestreos (Véase figura 63). Las concentraciones más elevadas detectadas de Sb⁵⁺ corresponden a los análisis del 27 de enero del 2021 (Véase figura 62).

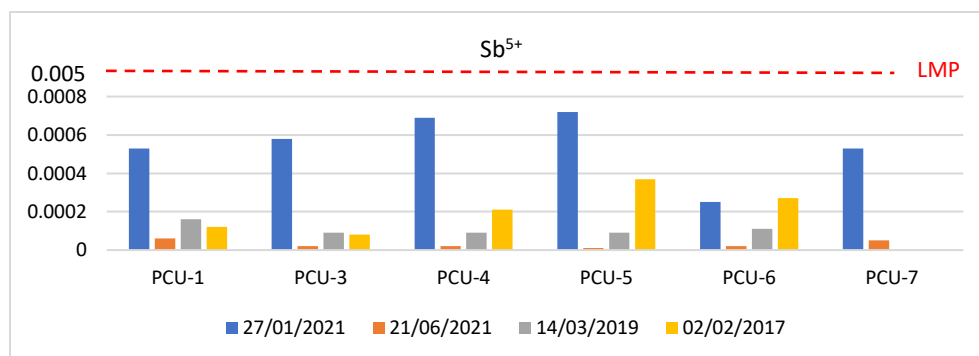
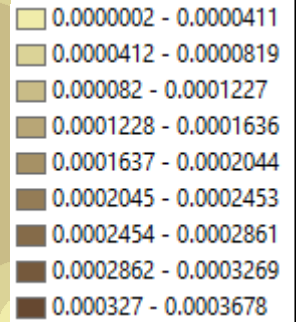
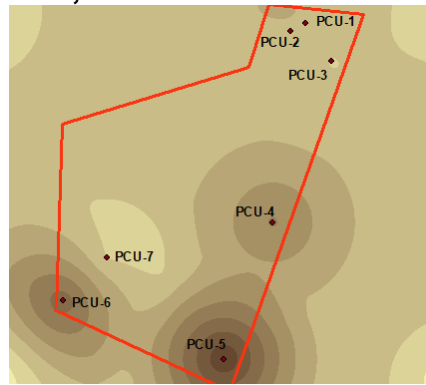
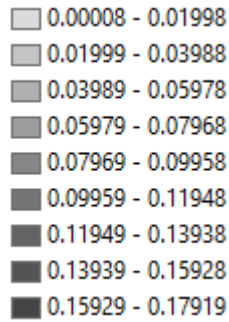
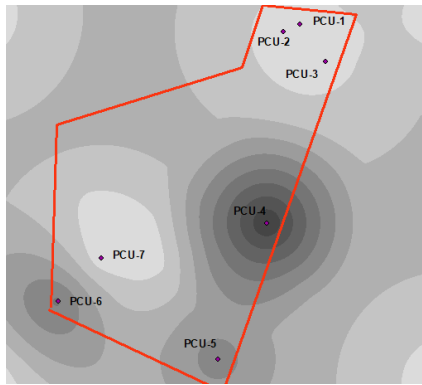
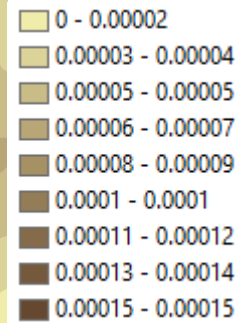
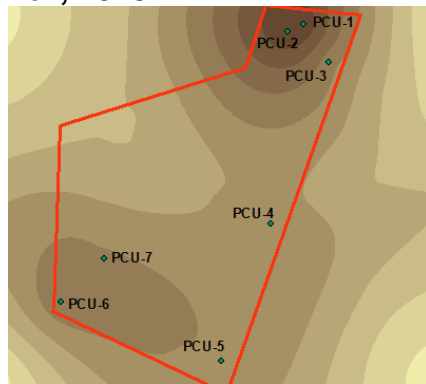
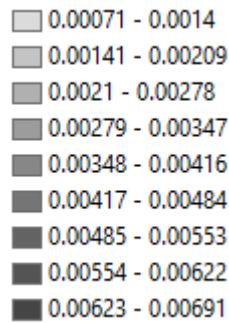
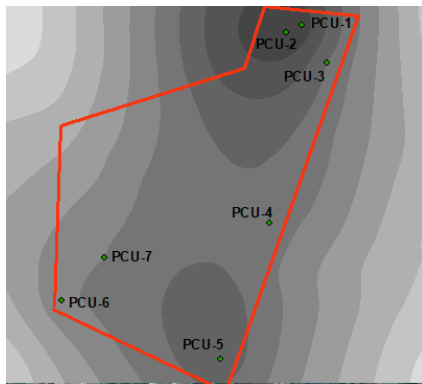


Figura 62. Concentraciones de Sb⁵⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

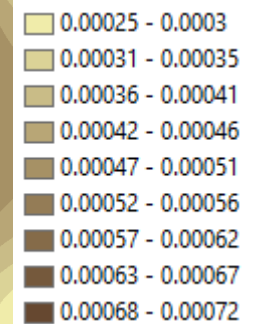
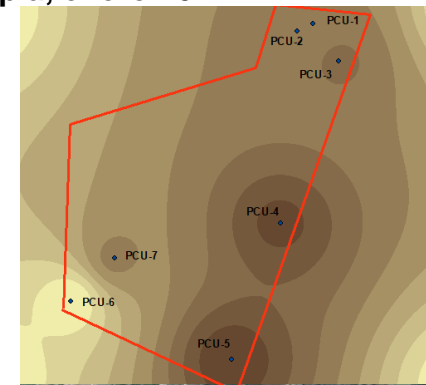
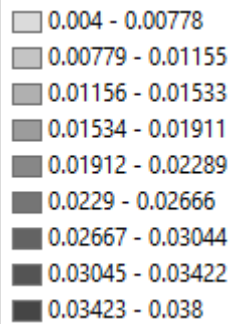
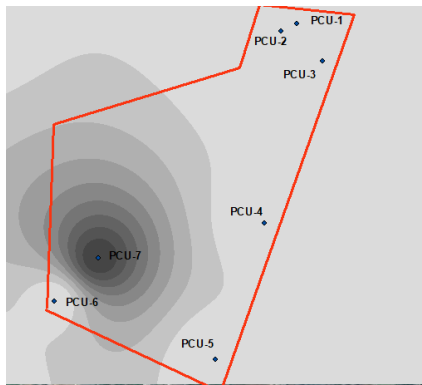
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

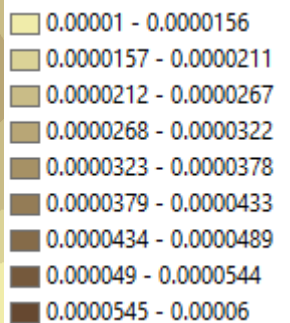
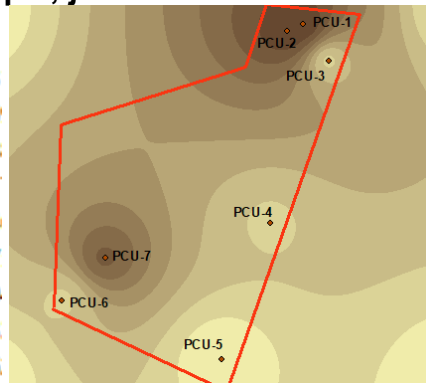
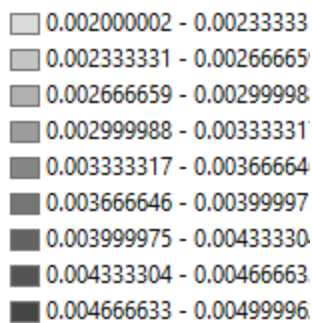
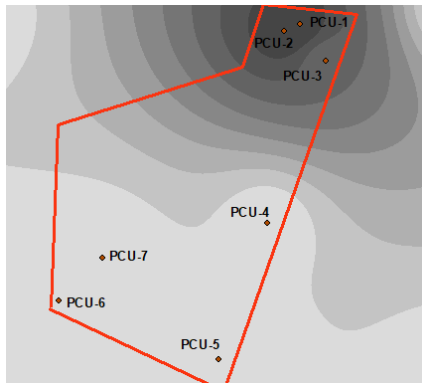


Figura 63. Mapas temáticos de distribución en representación del Al^{3+} y del Sb^{5+} (elaboración propia, 2021).

3. As⁵⁺

La principal fuente de As⁵⁺ en el agua es la disolución de minerales. La vía de exposición más importante es la vía oral. El As⁵⁺ del agua de consumo afecta significativamente a la salud. (ATSDR, 2021). Las concentraciones de As⁵⁺ se desplazaron durante los distintos muestreos (Véase figura 66). Las concentraciones más elevadas detectadas corresponden a los análisis del 27 de junio del 2021 obtenidos en la presente investigación (Véase figura 64).

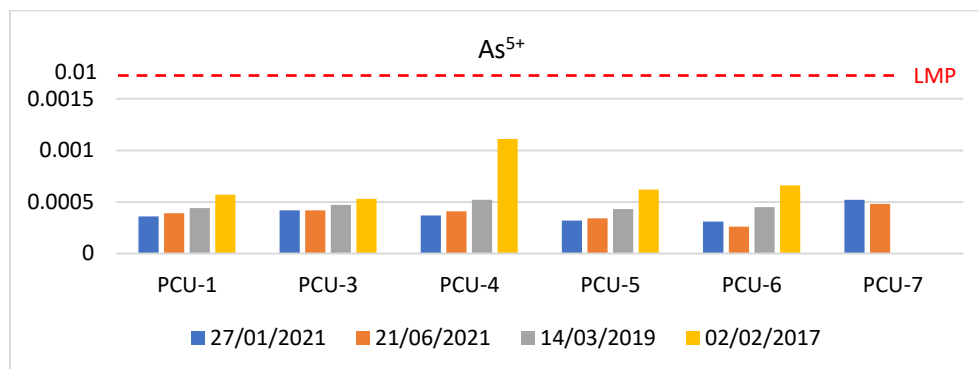


Figura 64. Concentraciones de As⁵⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

4. Ba²⁺

El Ba²⁺ está presente en las rocas ígneas y sedimentarias, el Ba²⁺ presente en el agua proviene principalmente de fuentes naturales. Su sal más común es el Sulfato de Bario (BaSO₄) y la menos común el Carbonato de Bario (BaCO₃) (ECOFLUIDOS, 2012). El BaSO₄ también se usa para fabricar pinturas, ladrillos, baldosas, vidrio, caucho y otros materiales (ATSDR, 2021). El Ba²⁺ se concentró en el pozo PCU-5 en todos los muestreos analizados (Véanse figuras 65 y 66).

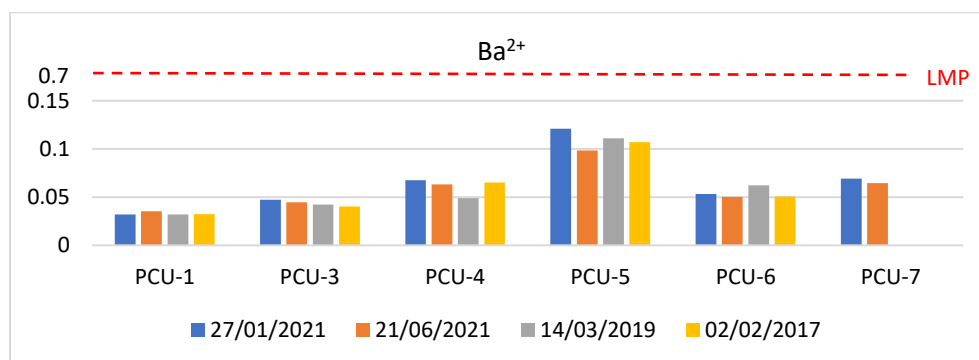
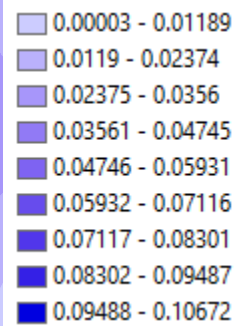
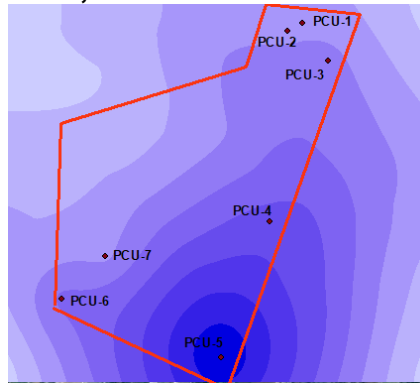
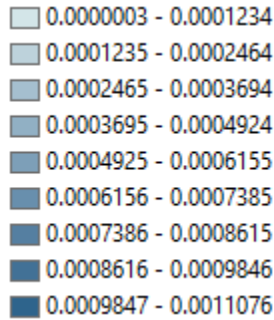
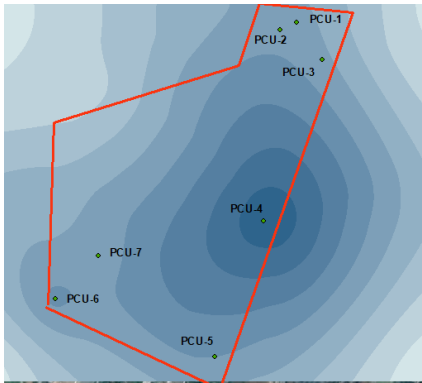
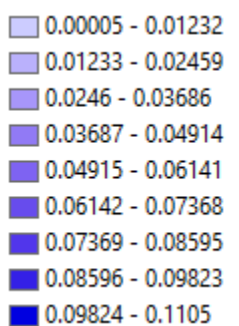
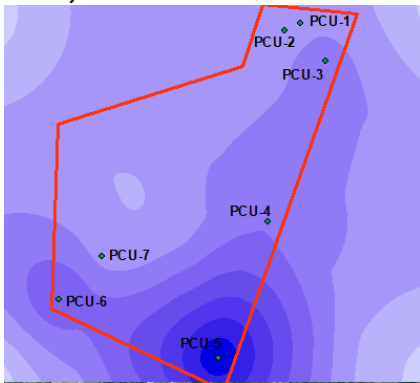
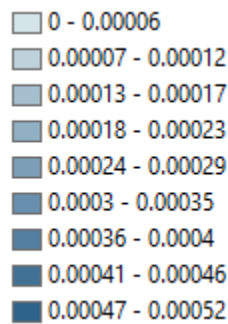
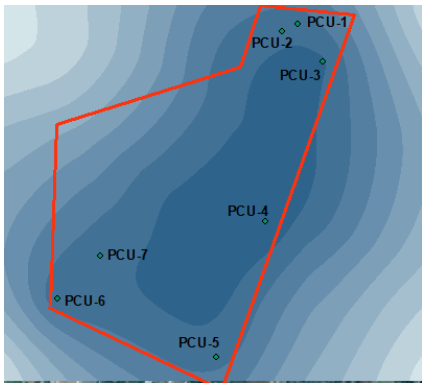


Figura 65. Concentraciones de Ba²⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

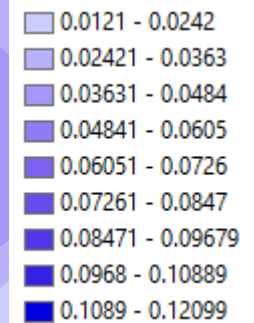
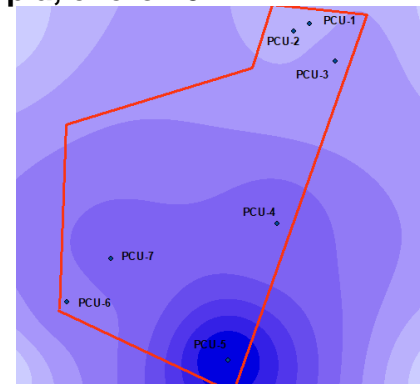
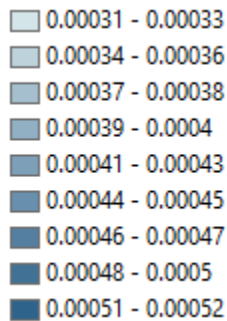
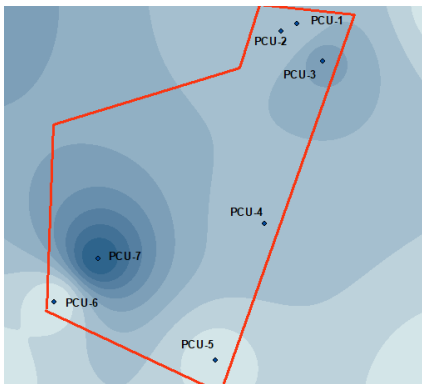
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

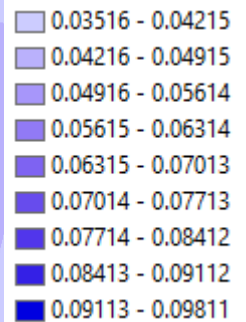
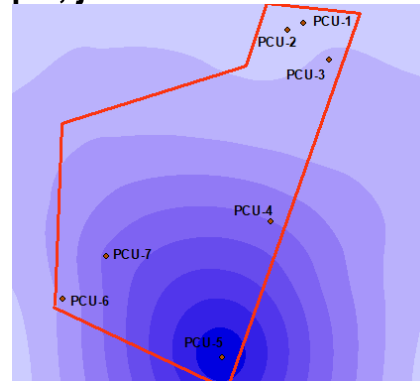
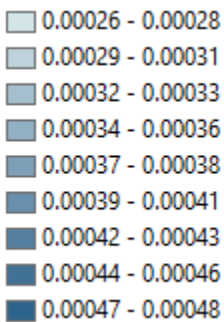
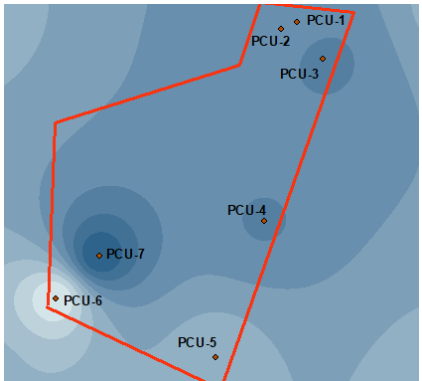


Figura 66. Mapas temáticos de distribución en representación del As⁵⁺ y del Ba²⁺ (elaboración propia, 2021).

5. Be²⁺

El Be²⁺ se presenta en la naturaleza formando diversos compuestos minerales. (ECOFLUIDOS, 2012). Es usado para crear componentes electrónicos, materiales para la construcción de maquinarias, moldes para plásticos, piezas dentales, máquinas de rayos X y espejos. Al ser inhalado, el Be²⁺ puede dañar los pulmones. (ATSDR, 2021). Las concentraciones de Be²⁺ se presentaron en distintos puntos de muestreo (Véase figura 69). Las cantidades de Be²⁺ en los últimos 3 muestreos fueron mayores (Véase figura 67).

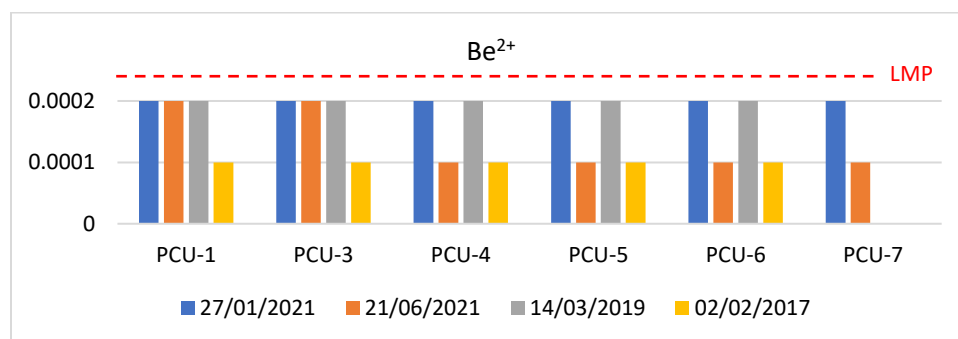


Figura 67. Concentraciones de Be²⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

6. Bi⁵⁺

Este elemento hasta la fecha no parece ser responsable de intoxicación en seres humanos, al ser poco soluble en el plasma sanguíneo rápidamente es eliminado por vía urinaria y fecal. En las normativas de aguas residuales, no se menciona un LMP para el Bi⁵⁺. Lo anterior, se presenta porque el Bi⁵⁺ se usa en la actualidad en tratamientos médicos (ATSDR, 2021). Las concentraciones de Bi⁵⁺ fueron variables en todas las mediciones (Véanse figuras 68 y 69).

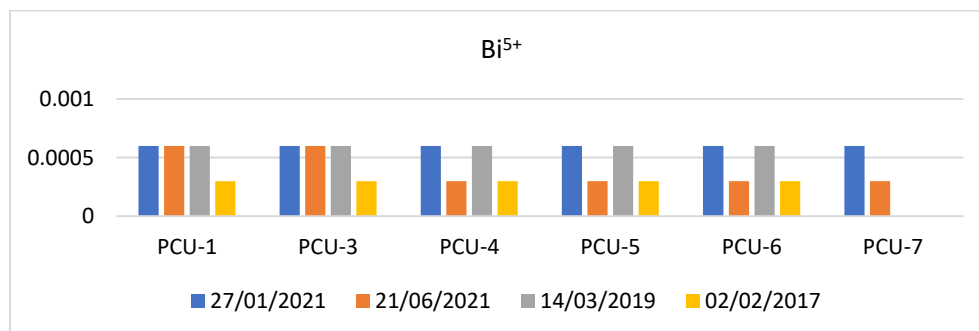
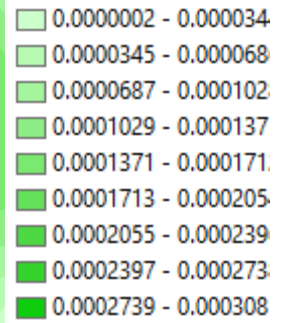
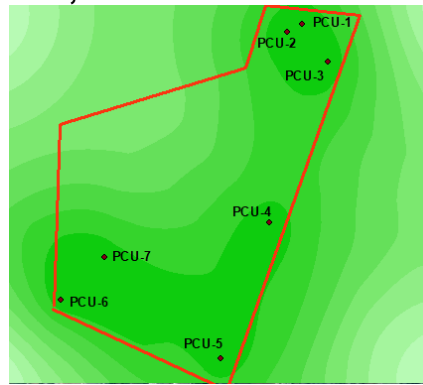
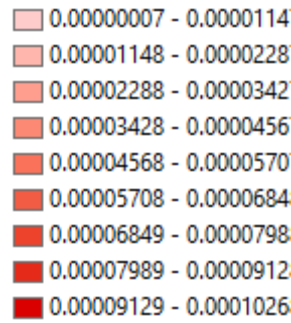
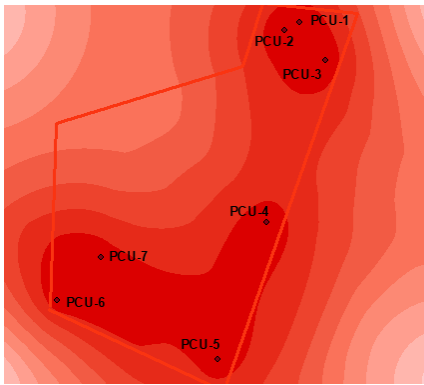
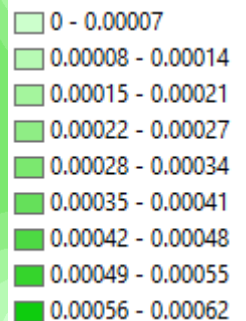
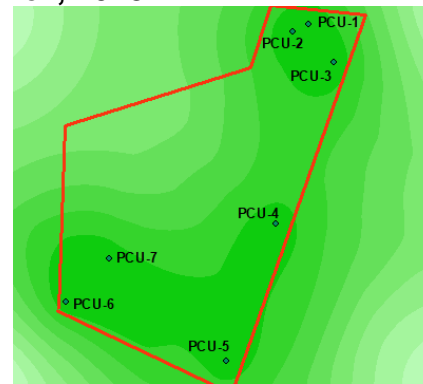
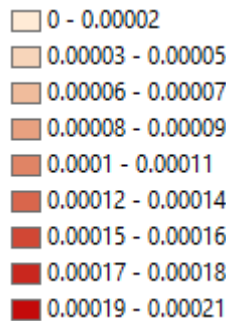
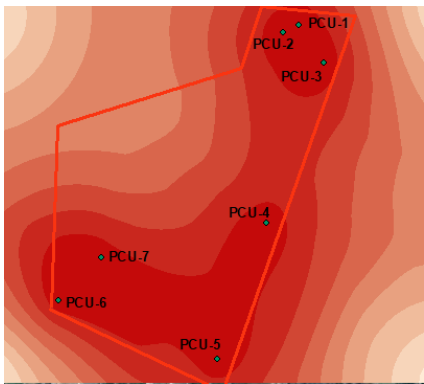


Figura 68. Concentraciones de Bi⁵⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

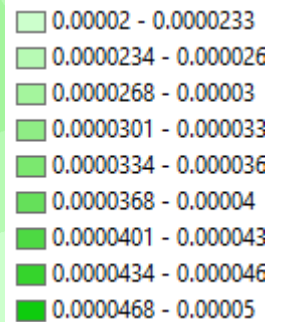
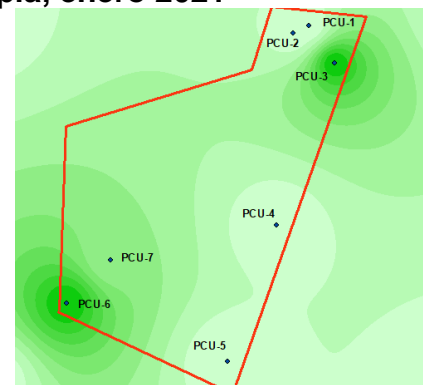
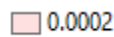
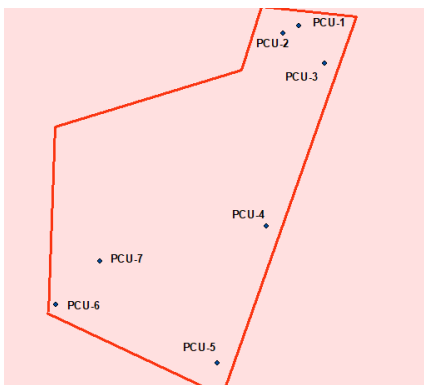
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

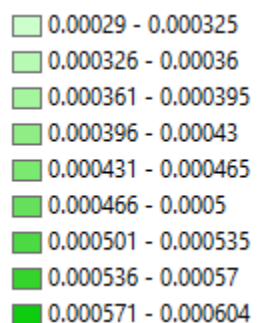
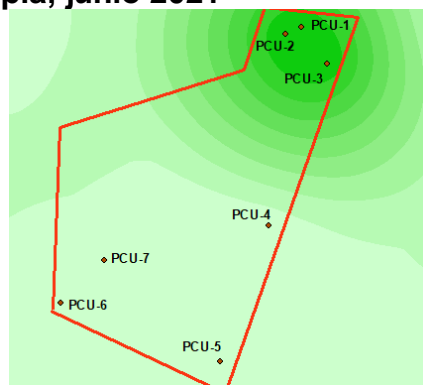
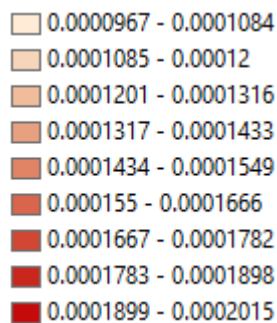
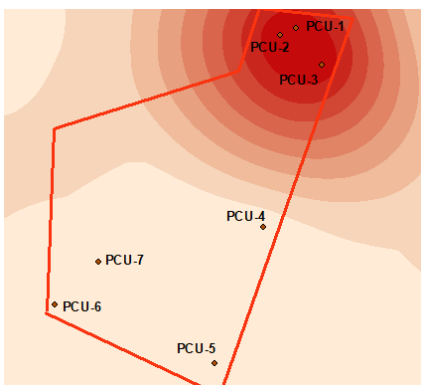


Figura 69. Mapas temáticos de distribución en representación del Be²⁺ y del Bi⁵⁺ (elaboración propia, 2021).

7. Cd²⁺

El Cd²⁺ es utilizado en la industria del acero y en los plásticos. El Cd²⁺ se libera al medio ambiente en las aguas residuales (ECOFLUIDOS, 2012). Respirar aire con niveles altos de Cd²⁺ puede dañar los pulmones y causar la muerte (ATSDR, 2021). La concentración más elevada de Cd²⁺ fue en la medición del año 2019 para el PCU-1 (Véase figura 70), Las concentraciones de este elemento fueron variables en las distintas mediciones (Véase figura 72).

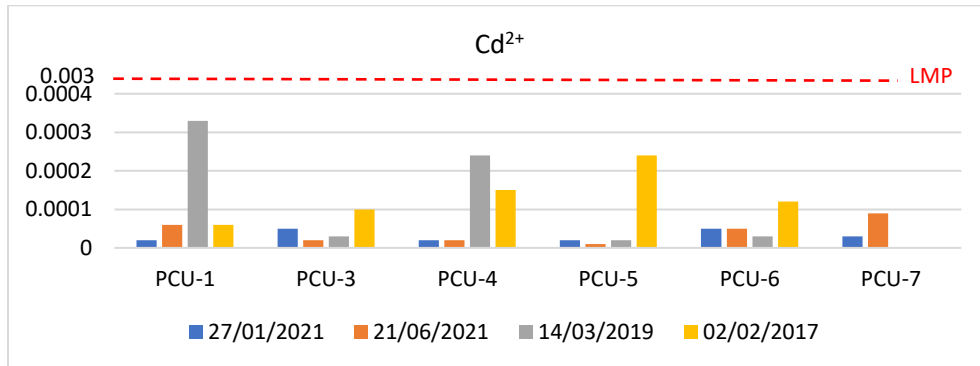


Figura 70. Concentraciones de Cd²⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

8. Ca²⁺

Aguas subterráneas en contacto con rocas sedimentarias obtienen parte del contenido de Ca²⁺ por procesos de disolución de calcita (Custodio & LLamas, 1983). Las concentraciones menores detectadas se localizan en las zonas ubicadas al suroeste (PCU-5, PCU-6 y PCU-7); estos valores oscilan entre 120 y 150 mg/L, mientras que el resto de los puntos muestreados tienen las concentraciones más altas que oscilan entre 160 y 210 mg/L (Véanse figuras 71 y 72). Se consideran concentraciones normales de Ca²⁺ entre 10-100 mg/L (Davis & De Wiest, 1966).

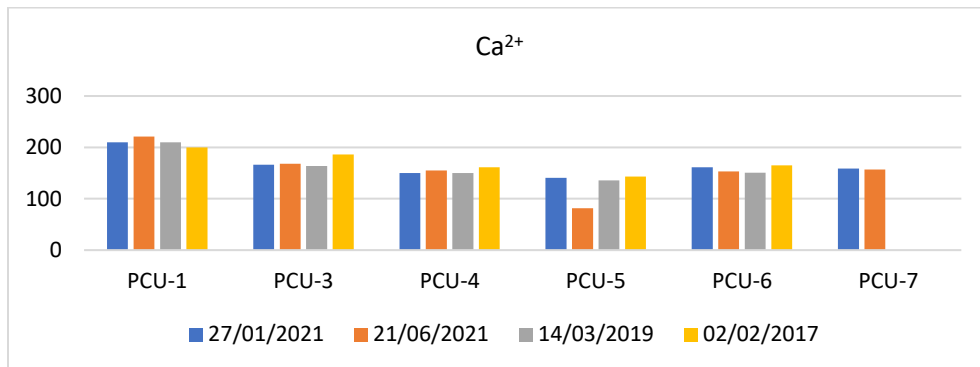
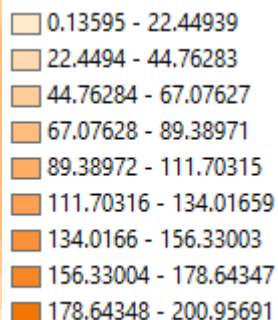
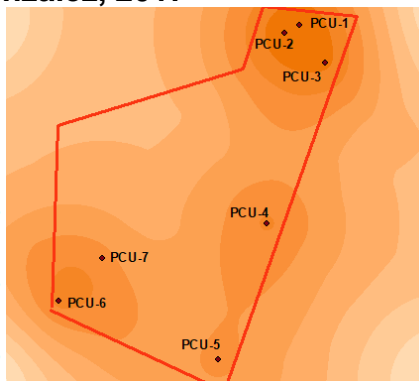
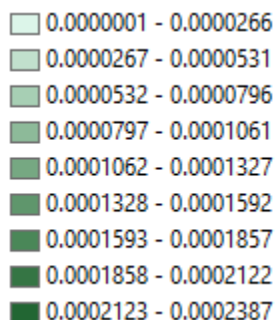
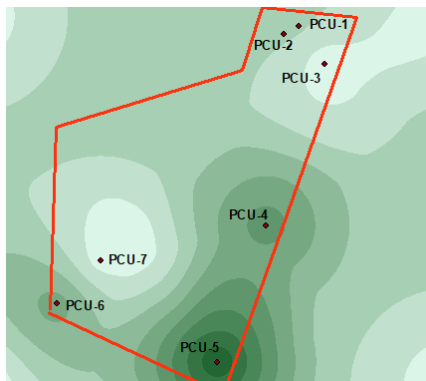
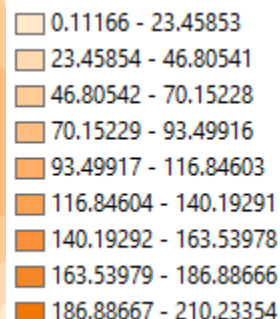
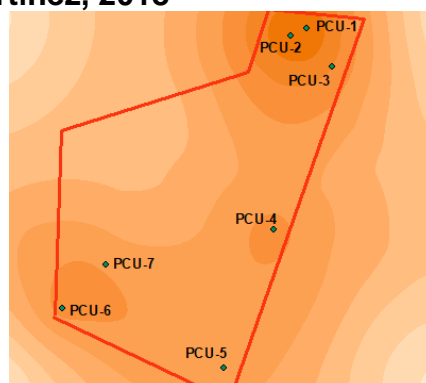
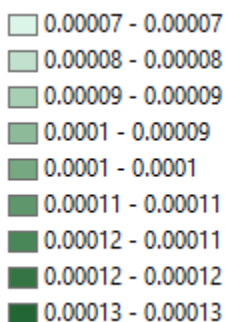
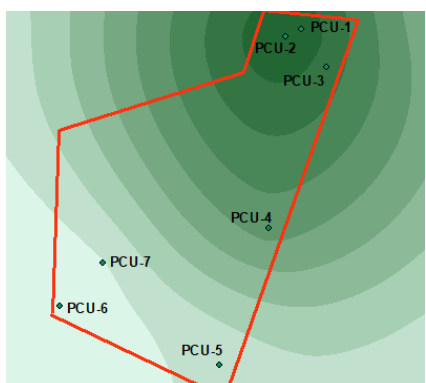


Figura 71. Concentraciones de Ca²⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

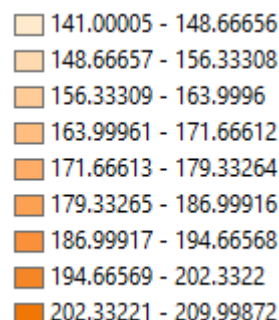
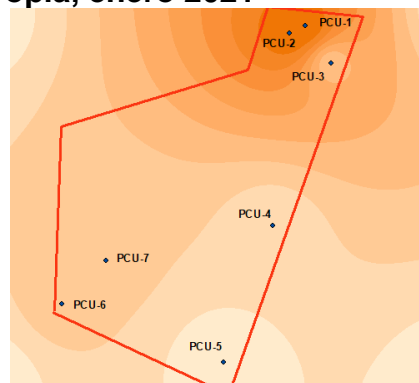
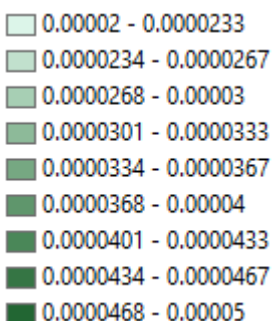
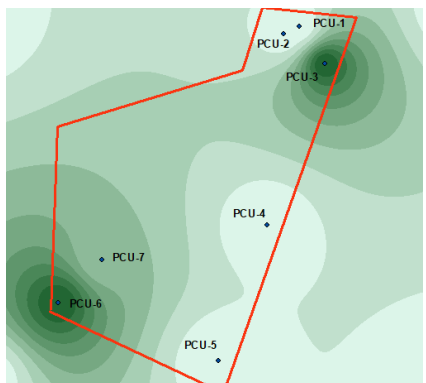
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

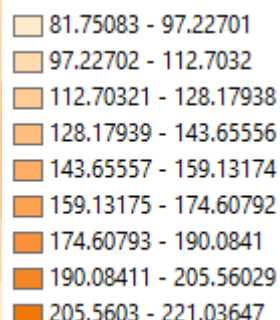
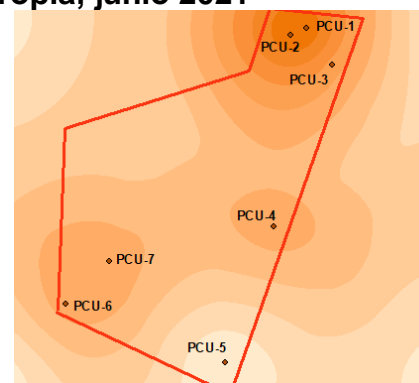
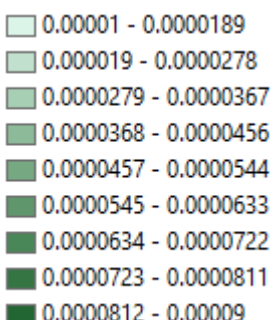
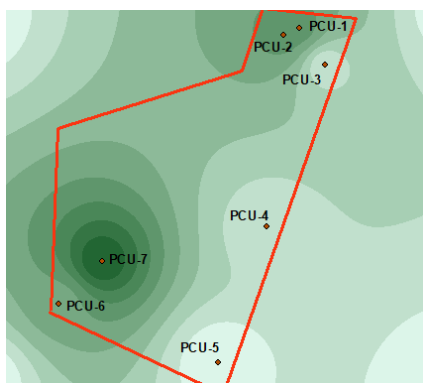


Figura 72. Mapas temáticos de distribución en representación del Cd²⁺ y del Ca²⁺ (elaboración propia, 2021).

9. Ce⁴⁺

Elemento químico Ce⁴⁺, es el elemento metálico más abundante del grupo de las tierras raras en la tabla periódica (ECOFLUIDOS, 2012). Las concentraciones menores detectadas se localizan en las zonas ubicadas al noreste (PCU-1 y PCU-3), los valores oscilan entre 0.000542 y 0.000001mg/L (Véanse figuras 73 y 75).

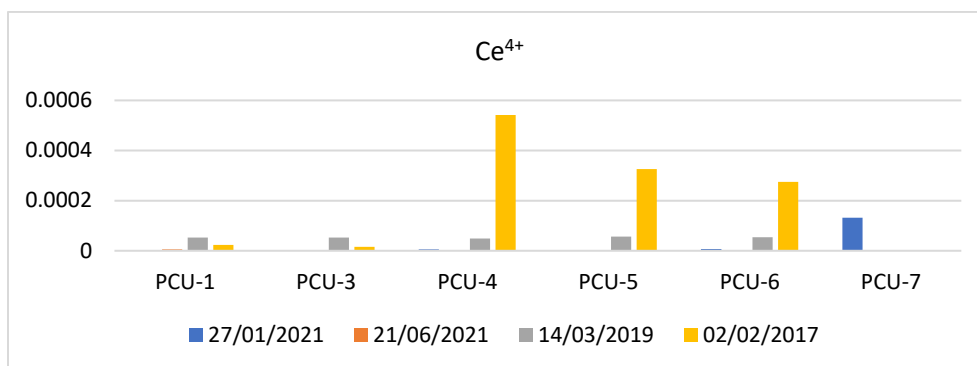


Figura 73. Concentraciones de Ce⁴⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

10. Cs⁺

El Cs⁺ que se encuentra naturalmente en el ambiente proviene de la erosión y el desgaste de rocas y minerales. El minado de minerales puede liberar Cs⁺ al aire, el agua y el suelo. El Cs⁺ es liberado al ambiente durante la operación de plantas de energía nuclear, la detonación de armas nucleares y accidentes en plantas de energía nuclear. Es improbable inhalar o ingerir cantidades de Cs⁺ suficientemente altas para causar daños a la salud (ATSDR, 2021). Las concentraciones más elevadas de Cs⁺ se localizaron en el PCU-4 (Véanse figuras 74 y 75).

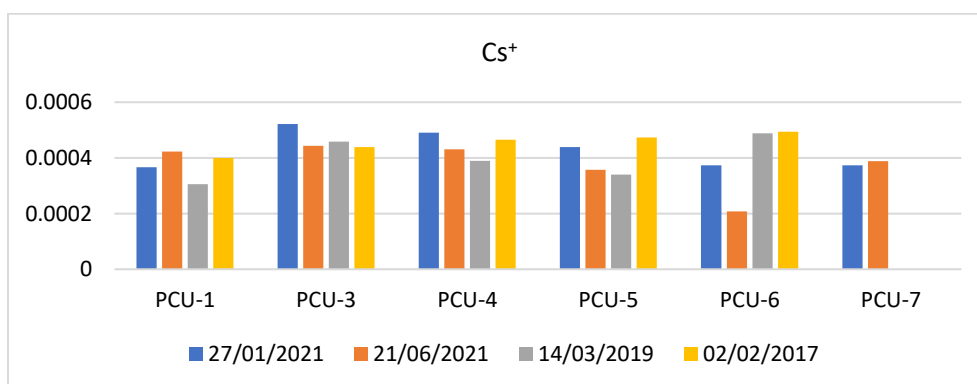
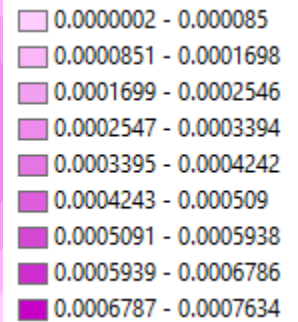
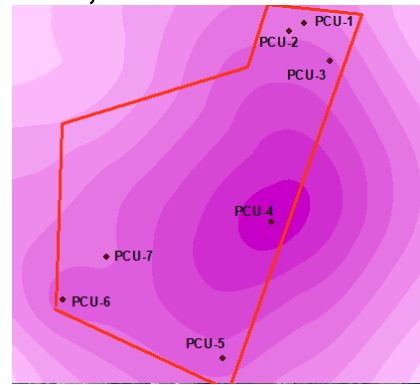
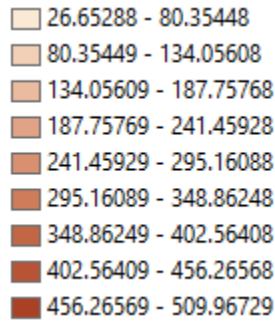
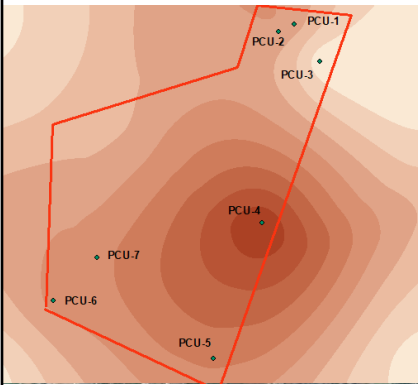
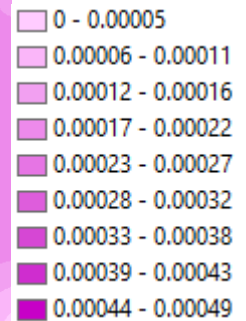
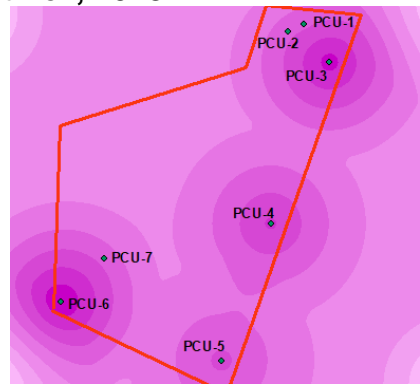
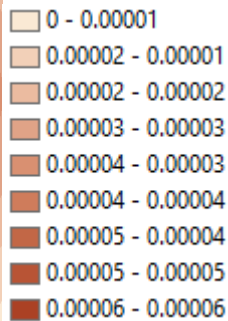
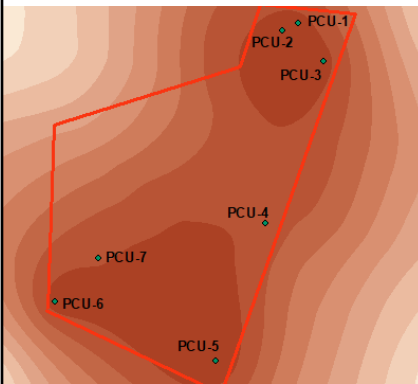


Figura 74. Concentraciones de Cs⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

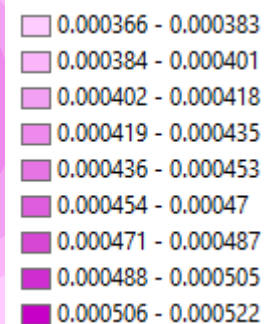
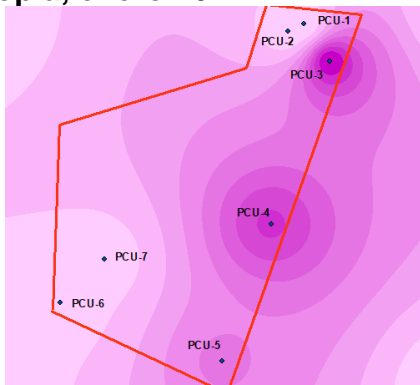
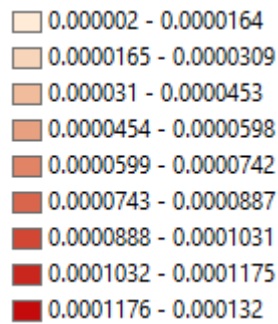
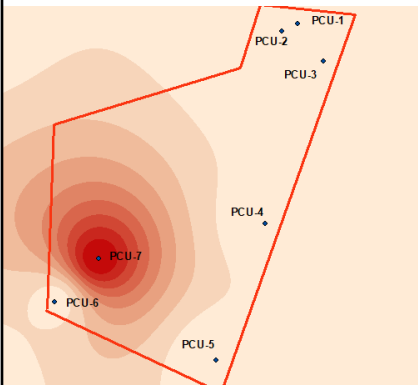
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

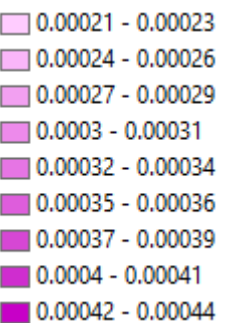
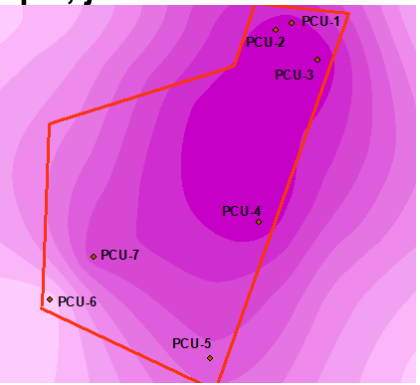
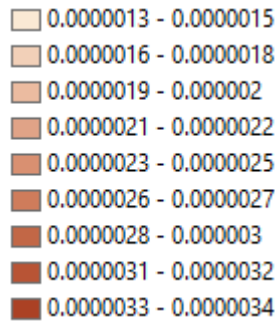
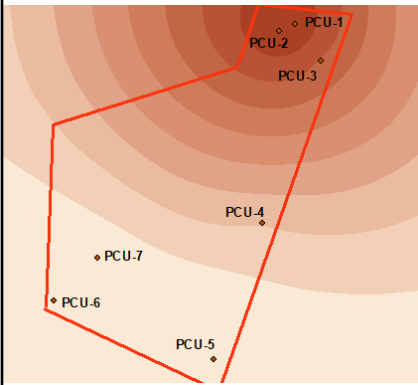


Figura 75. Mapas temáticos de distribución en representación del Ce⁴⁺ y del Cs⁺ (elaboración propia, 2021).

11. Zr⁴⁺

El Zr⁴⁺ es utilizado en la industria cerámica: refractarios, vidriados, barnizados, moldes fundidos y componentes de cerámica eléctrica. El Zr⁴⁺ y sus sales generalmente tienen baja toxicidad sistémica (ATSDR, 2021). Las concentraciones de Zr⁴⁺ más elevadas correspondieron al muestreo realizado por García 2017 (Véanse figuras 76 y 78).

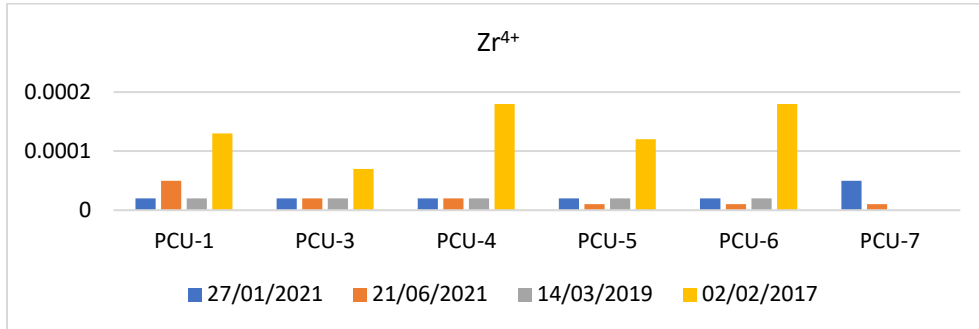


Figura 76. Concentraciones de Zr⁴⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

12. Cu²⁺

El Cu²⁺ es un nutriente esencial y, al mismo tiempo, un contaminante del agua de consumo. Las concentraciones de Cu²⁺ en el agua de consumo varían mucho, y la fuente principal más frecuente es la corrosión de tuberías de Cu²⁺ interiores (ECOFLUIDOS, 2012). Las concentraciones más elevadas de Cu²⁺ se presentaron en los análisis de García 2017 alcanzando valores de 0.0059 mg/L en el PCU-1 (Véanse figuras 77 y 78).

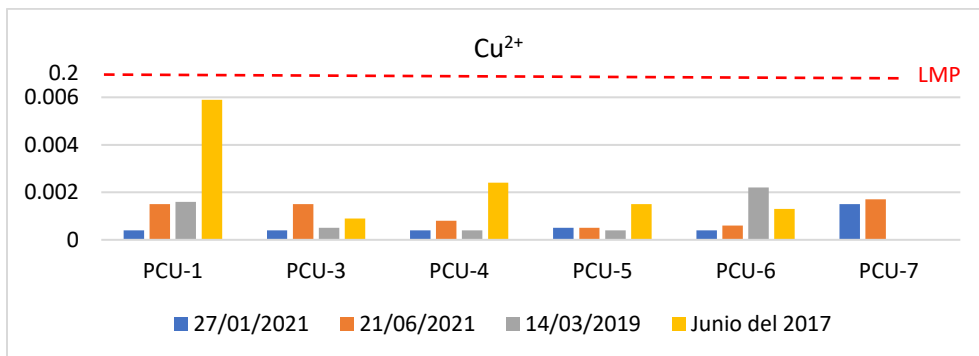
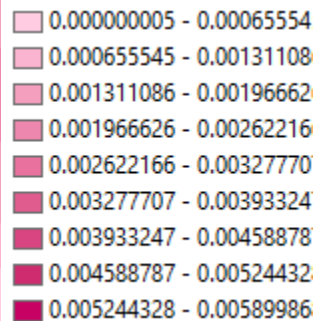
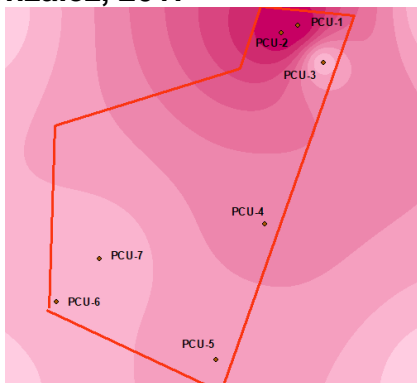
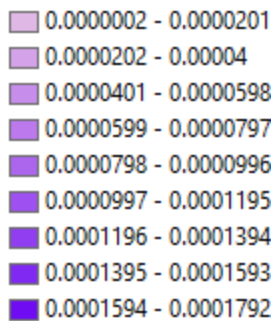
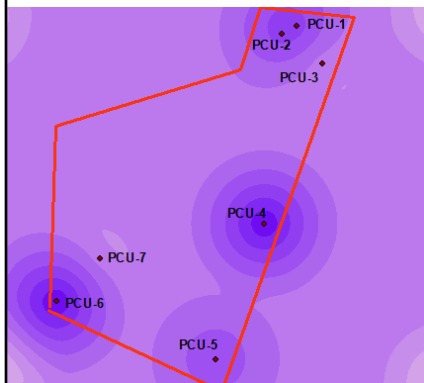
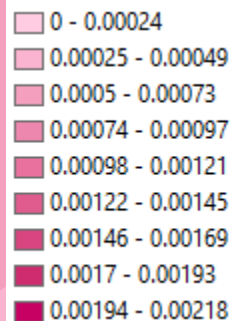
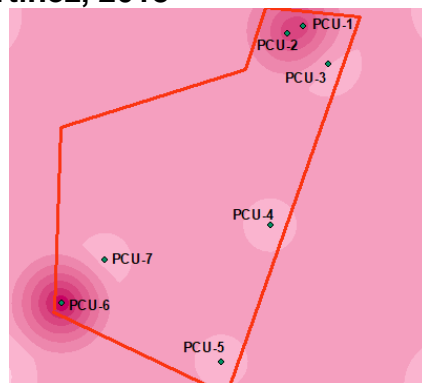
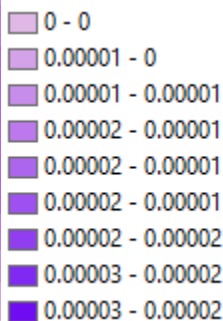
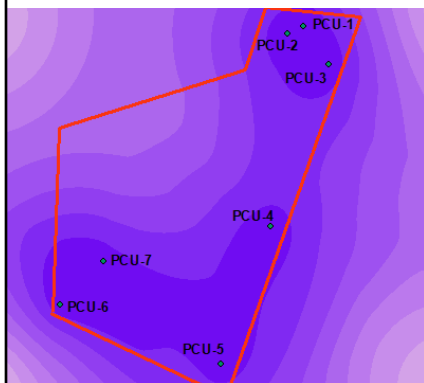


Figura 77. Concentraciones de Cu²⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

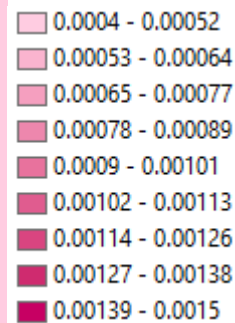
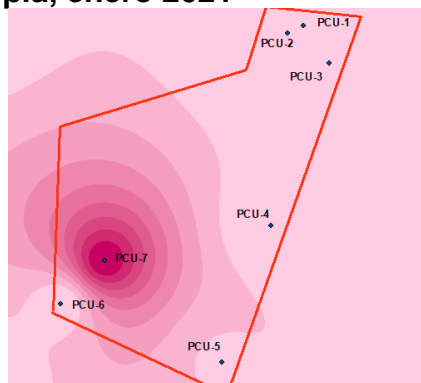
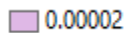
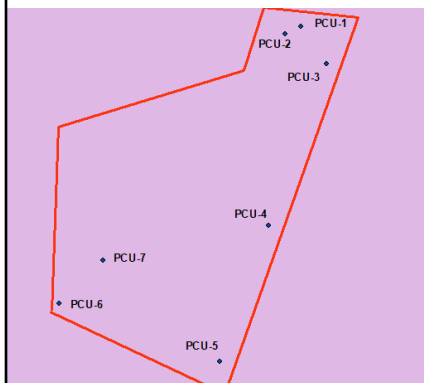
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

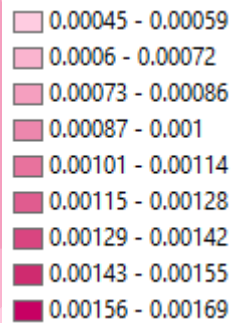
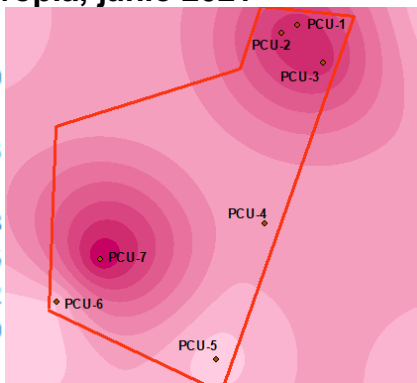
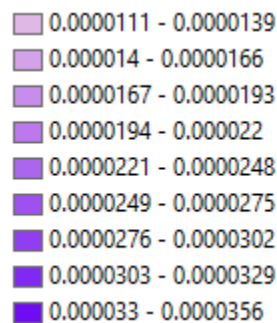
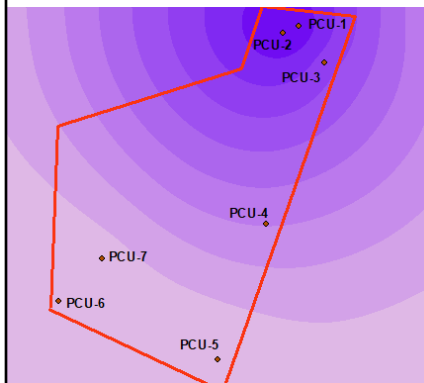


Figura 78. Mapas temáticos de distribución en representación del Zr⁴⁺ y del Cu²⁺ (elaboración propia, 2021).

13. Co^{3+}

El Co^{3+} ingresa al ambiente desde fuentes naturales y antropogénicos (ECOFLUIDOS, 2012). El Co^{3+} se utiliza en aleaciones (magnéticas, herramientas y quirúrgicas). Los efectos sobre la salud por exposición a Co^{3+} son: vómitos, náuseas, problemas de visión, problemas de corazón y daño del tiroides (ATSDR, 2021). La concentración más elevada de Co^{3+} corresponde al muestreo de García 2017 en el PCU-4 (Véanse figuras 79 y 81).

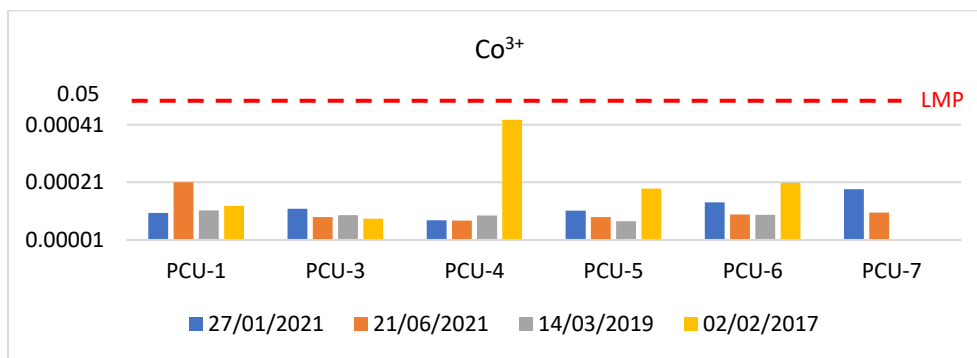


Figura 79. Concentraciones de Co^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).

14. Cr^{6+}

El Cr^{6+} es un elemento distribuido extensamente en la corteza terrestre (ECOFLUIDOS, 2012). Sus principales usos son la producción de aleaciones anticorrosivas de gran dureza y resistentes al calor y como recubrimiento para galvanizados. El Cr^{6+} es un peligro para la salud, mayoritariamente para la gente que trabaja en la industria del acero y textil (ATSDR, 2021). La concentración más elevada de Cr^{6+} detectada fue de 0.0034 mg/L en el pozo PCU-4 durante el muestreo de García 2017 (Véanse figuras 80 y 81).

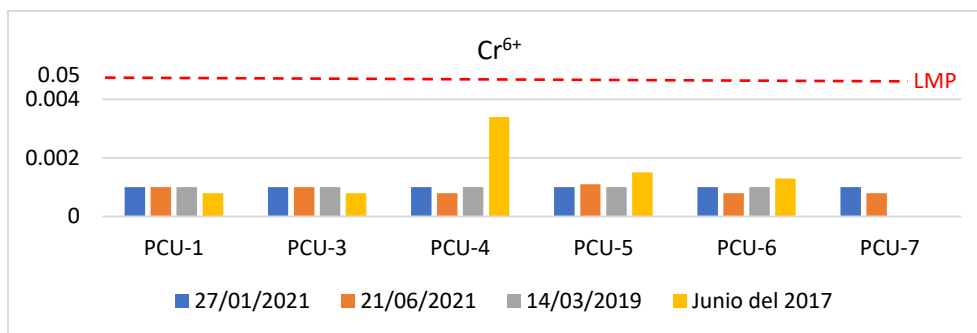
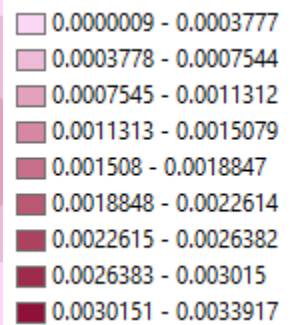
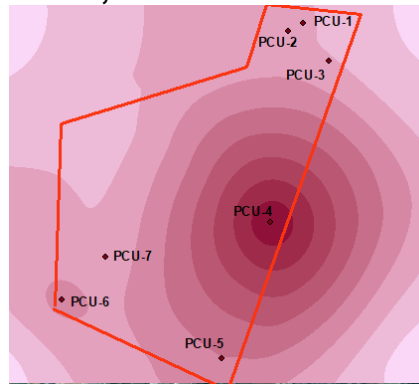
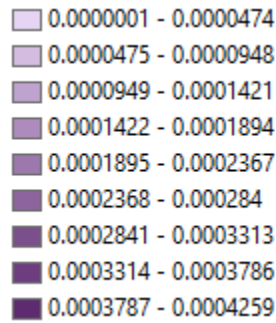
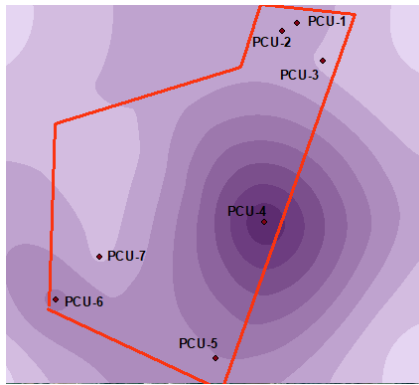
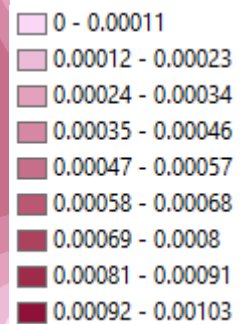
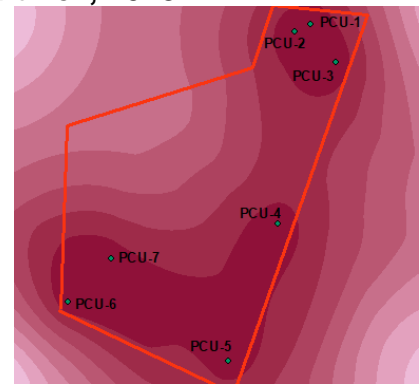
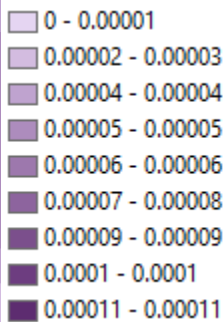
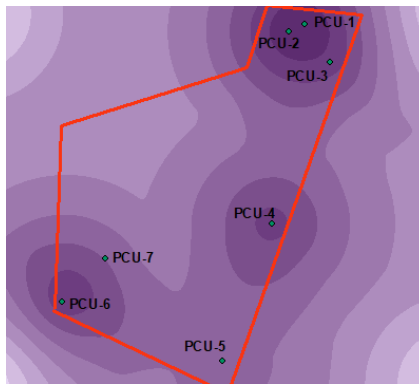


Figura 80. Concentraciones de Cr^{6+} en mg/L (elaboración propia, 2021).

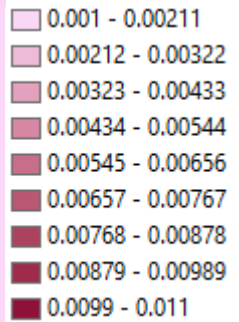
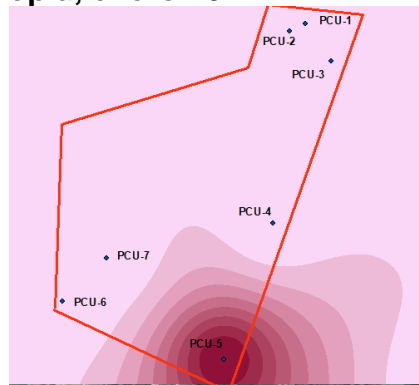
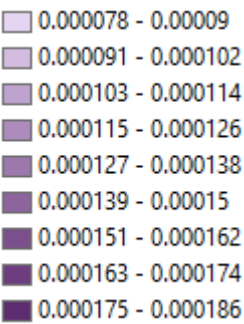
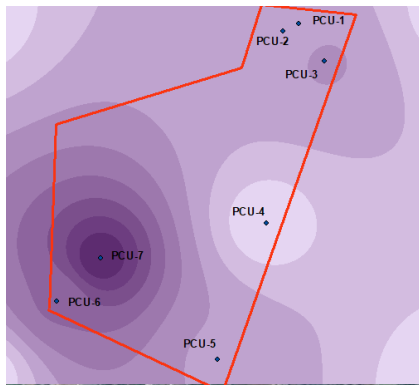
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

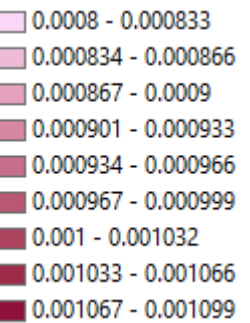
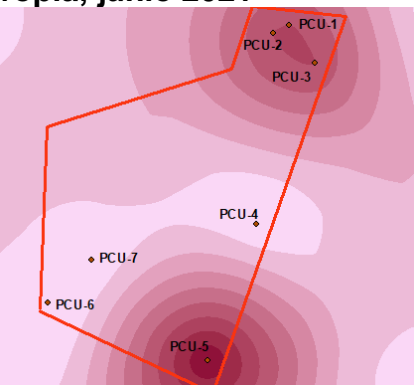
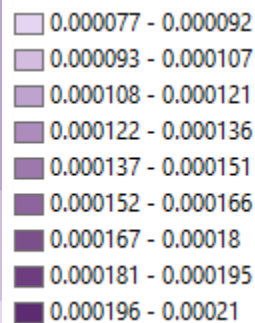
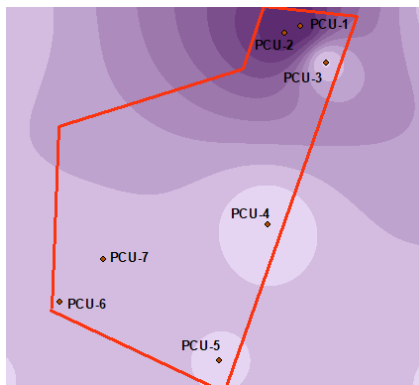


Figura 81. Mapas temáticos de distribución en representación del Co³⁺ y del Cr⁶⁺ (elaboración propia, 2021).

15. Sc³⁺

El Sc³⁺ se encuentra en formaciones graníticas (pegmatita) y en algunos minerales de las tierras raras. El Sc³⁺ es vertido al medio ambiente principalmente por industrias productoras de petróleo. Puede provocar embolias pulmonares, especialmente durante largas exposiciones (ATSDR, 2021). Las concentraciones más elevadas fueron de 0.002 mg/L y las concentraciones se distribuyeron principalmente en los pozos PCU-1 y PCU-3 (Véanse figuras 82 y 84).

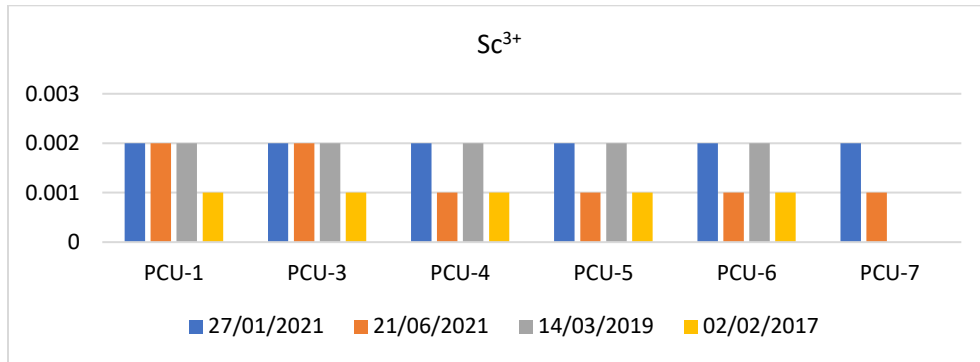


Figura 82. Concentraciones de Sc³⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

16. Sr²⁺

Es el menos abundante de los metales, suele ser usado en pirotecnia y señalamiento de vías férreas. En grandes concentraciones puede producir anemia, falta de oxígeno y cáncer (ATSDR, 2021). Las concentraciones de Sr²⁺ se presentaron en todos los sitios de muestreo, las cantidades más significativas surgieron en los pozos PCU-1 y PCU-3 (Véanse figuras 83 y 84).

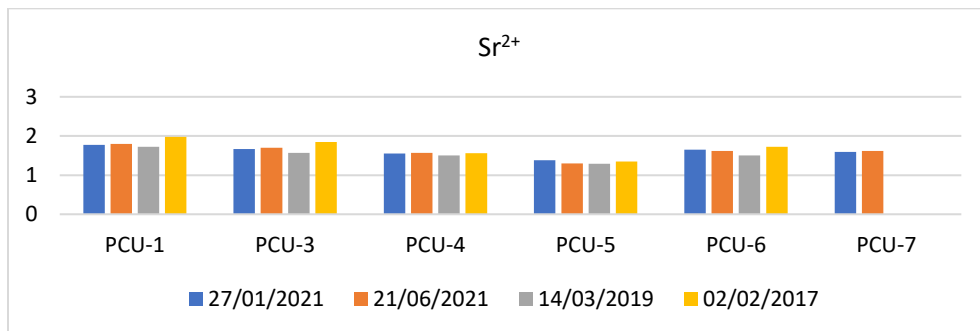
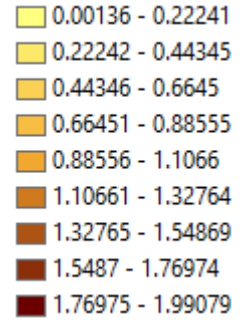
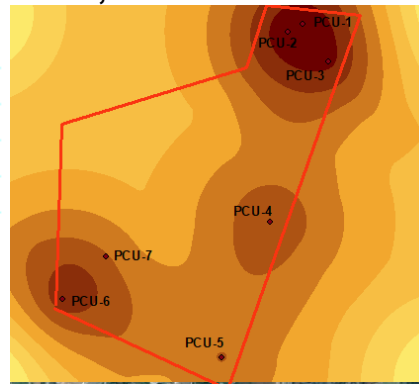
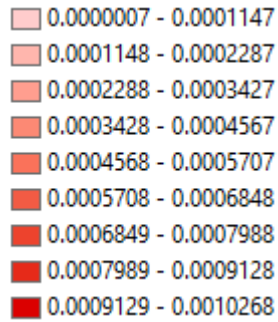
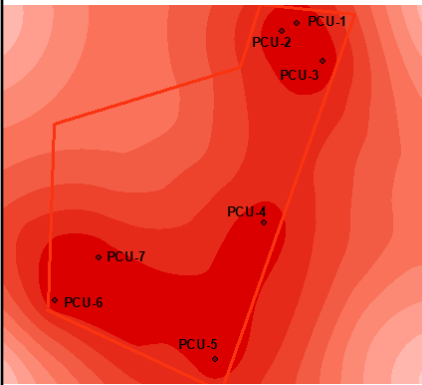
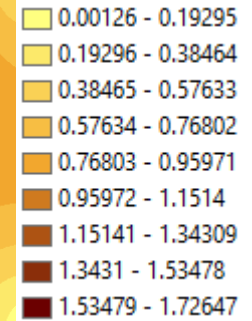
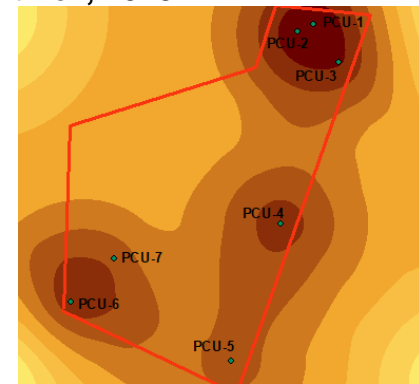
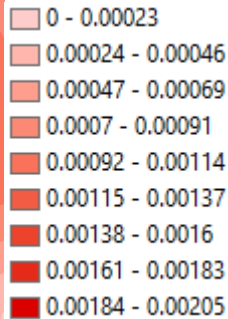
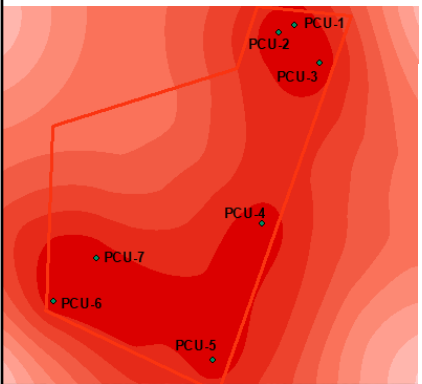


Figura 83. Concentraciones de Sr²⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

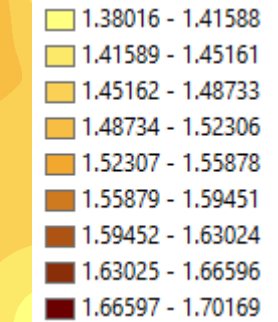
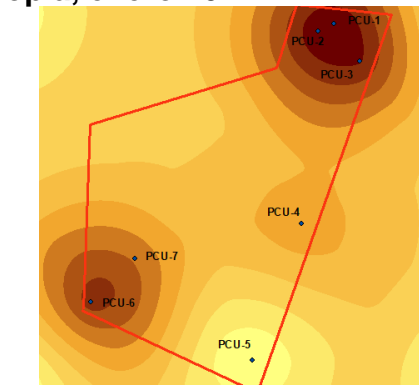
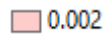
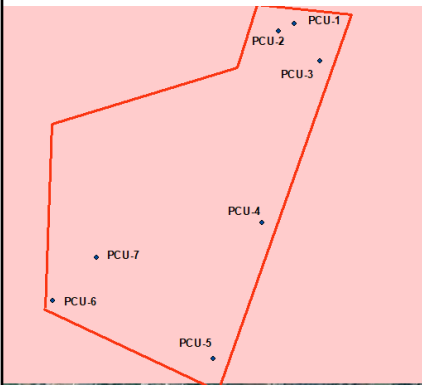
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

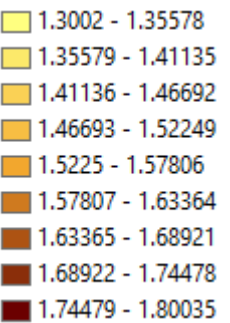
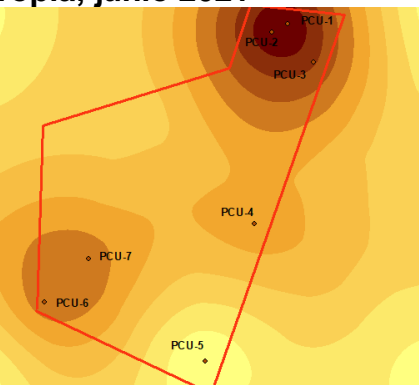
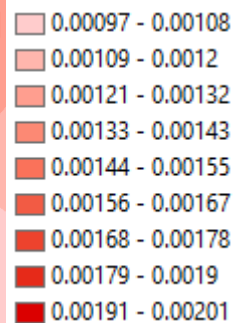
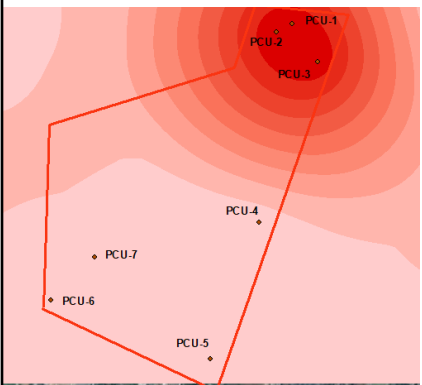


Figura 84. Mapas temáticos de distribución en representación del Sc^{3+} y del Sr^{2+} (elaboración propia, 2021).

17. Sn⁴⁺

El Sn⁴⁺ es empleado para: recubrimiento de envases de acero, aleaciones para soldar, bronce, peltres y aleaciones industriales diversas. Los efectos a la salud son: irritación de ojos y piel, dolores de cabeza, dolores de estómago, vómitos y mareos, sudoración severa, falta de aliento y problemas para orinar (ATSDR, 2021). Las concentraciones más elevadas detectadas fueron en el muestreo de junio 2021 (PCU-1) y en el muestreo de enero 2021 (PCU-3) (Véanse figuras 85 y 87).

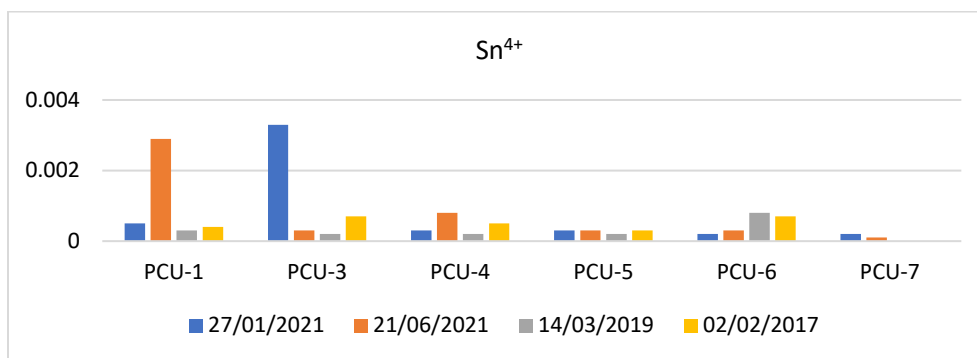


Figura 85. Concentraciones de Sn⁴⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

18. Eu³⁺

El Eu³⁺ puede ser encontrado en televisiones a color, lámparas fluorescentes y cristales. Raramente se encuentra en la naturaleza. La exposición a Eu³⁺ por largo plazo puede causar embolias pulmonares (ATSDR, 2021). Las concentraciones más elevadas se detectaron en los análisis de junio del 2021, predominando su concentración en el PCU-5 (Véanse figuras 86 y 87).

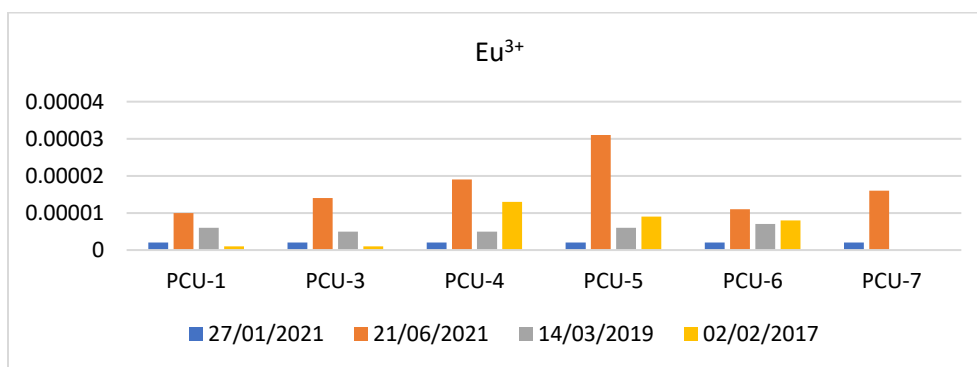
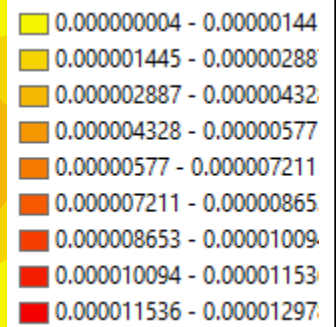
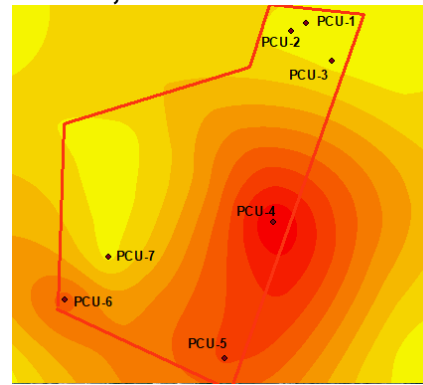
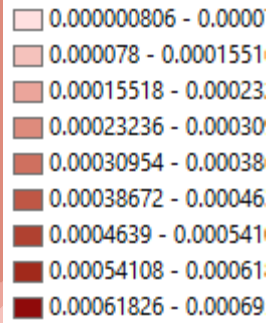
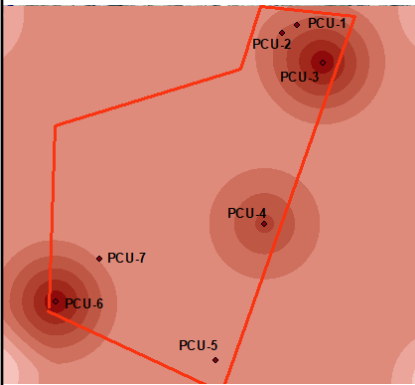
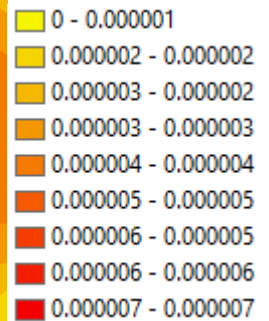
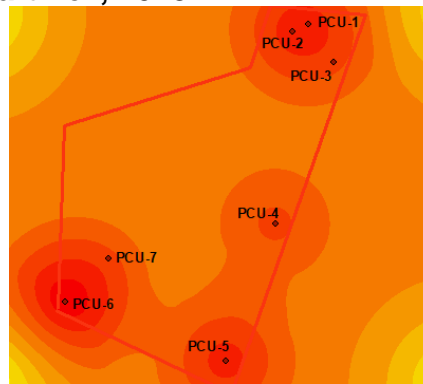
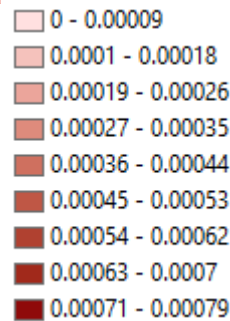
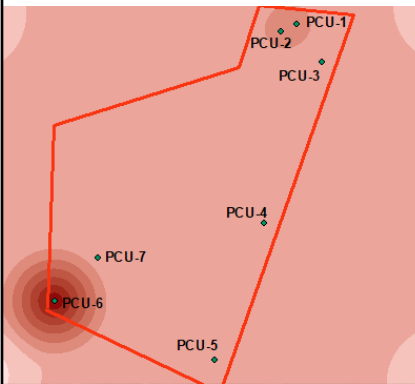


Figura 86. Concentraciones de Eu³⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

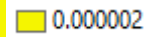
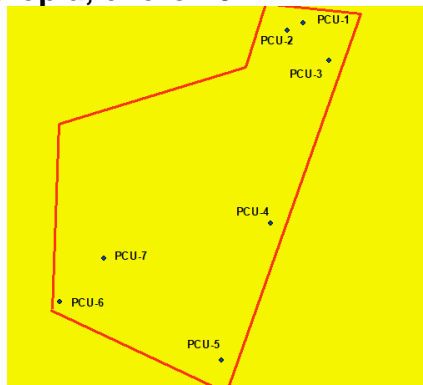
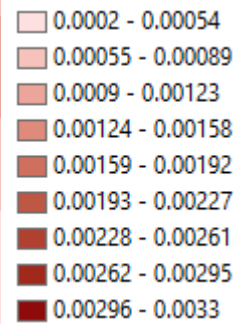
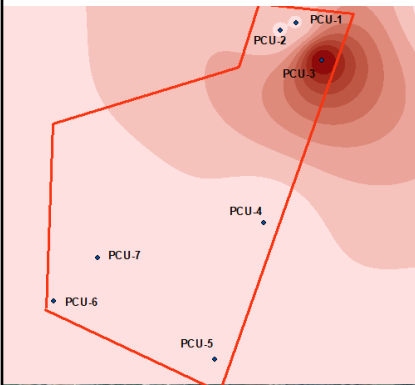
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

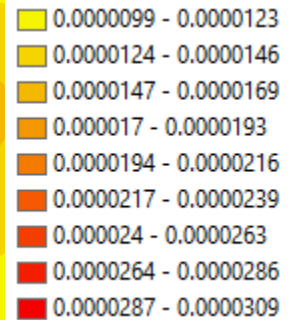
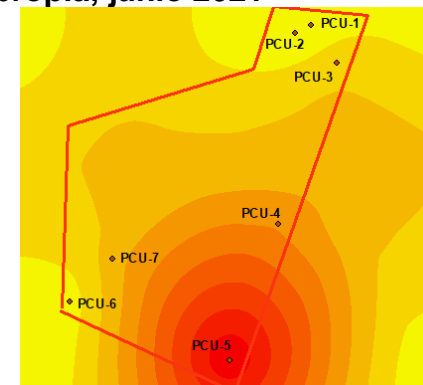
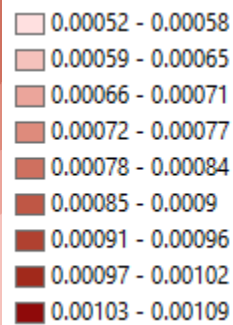
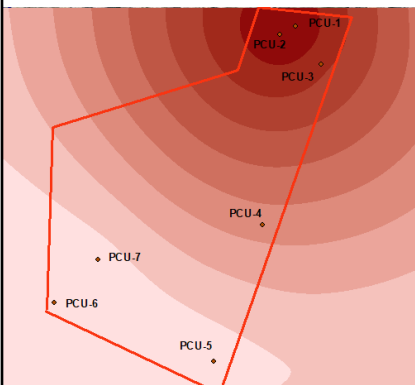


Figura 87. Mapas temáticos de distribución en representación del Sn⁴⁺ y del Eu³⁺ (elaboración propia, 2021).

19. Gd³⁺

El Gd³⁺ puede ser encontrado en televisiones, lámparas y cristales. Raramente se encuentra en la naturaleza. La exposición a Gd³⁺ por largo plazo puede causar embolias pulmonares (ATSDR, 2021). Las concentraciones más elevadas se detectaron en los análisis de junio del 2017, predominando su concentración en los pozos PCU-4, 5 y 6 (Véanse figuras 88 y 90).

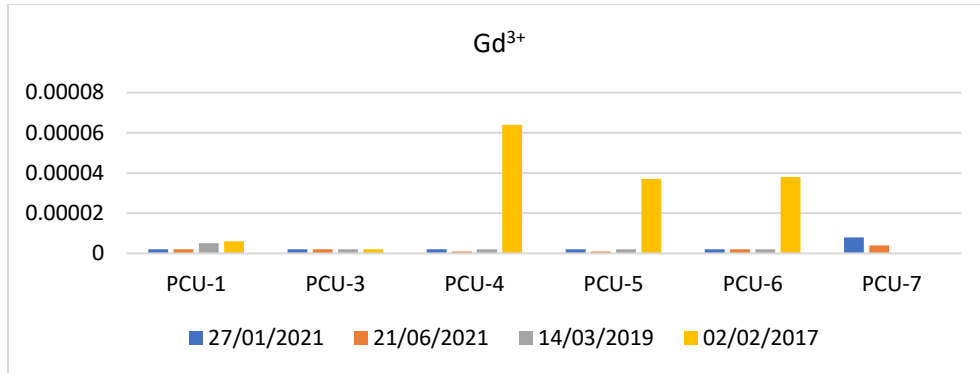


Figura 88. Concentraciones de Gd³⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

20. Ga³⁺

El Ga³⁺ es utilizado en curaciones dentales y para soldar materiales no metálicos. Altas exposiciones al Ga³⁺ pueden causar irritación de la garganta, dificultades de respiración, dolores pectorales, y sus vapores pueden provocar afecciones muy graves como edema pulmonar y parálisis parcial (ATSDR, 2021). Las cantidades más elevadas de Ga³⁺ se detectaron en los análisis del último muestreo realizado correspondiente a junio del 2021, las concentraciones fueron desde 0.00002 hasta 0.00885 mg/L (Véanse figuras 89 y 90).

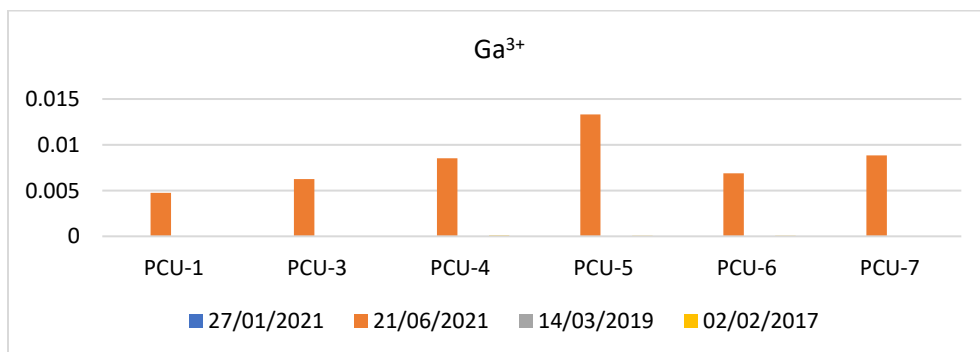
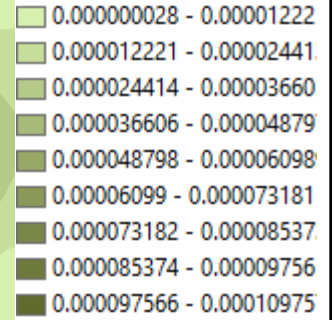
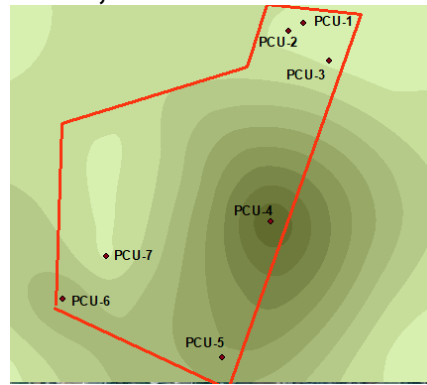
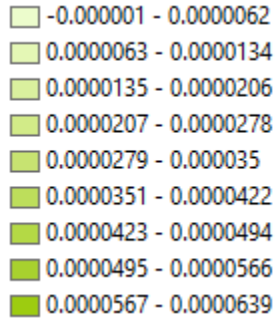
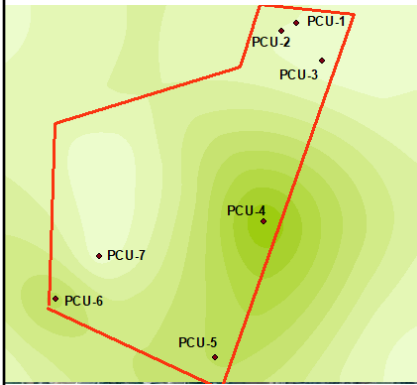
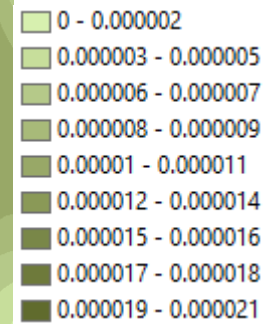
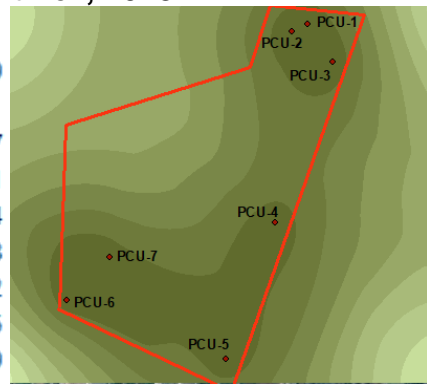
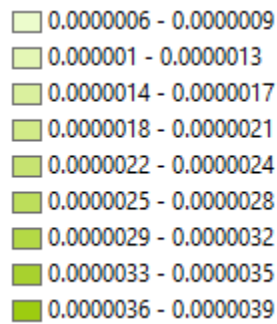
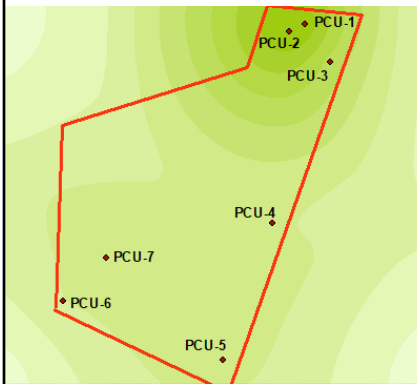


Figura 89. Concentraciones de Ga³⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

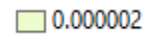
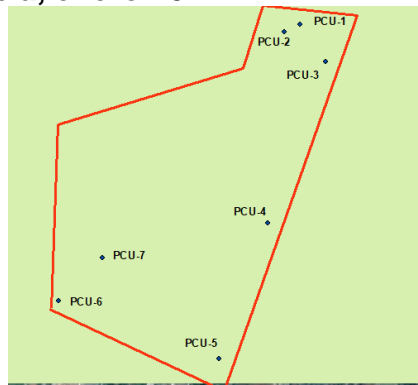
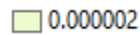
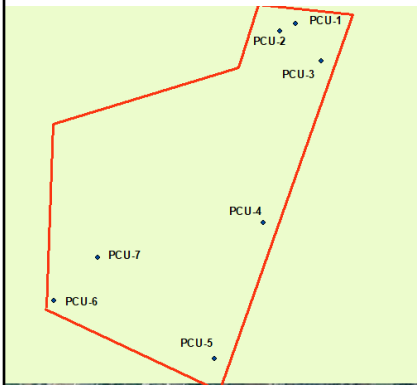
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

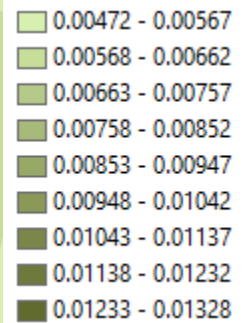
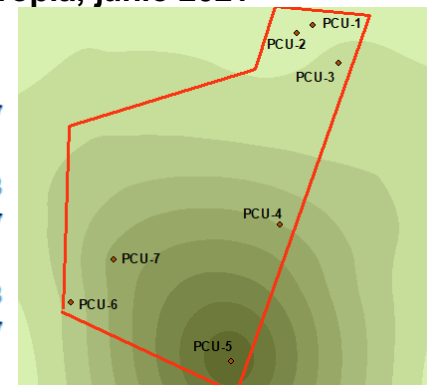
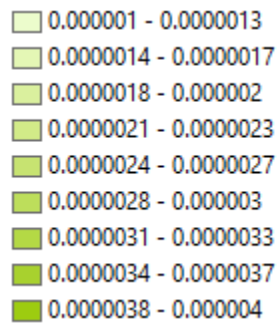
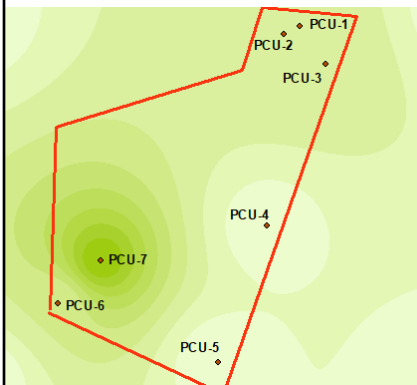


Figura 90. Mapas temáticos de distribución en representación del Gd^{3+} y del Ga^{3+} (elaboración propia, 2021).

21. Ge⁴⁺

El Ge⁴⁺ es de apariencia metálica, pero exhibe las propiedades físicas y químicas de un metal sólo en condiciones especiales. El Ge⁴⁺ tiene varias aplicaciones importantes, especialmente en la industria de los semiconductores. La inhalación del Ge⁴⁺ produce: calambres, sensación de quemadura, y tos (ATSDR, 2021). Se obtuvieron las concentraciones más elevadas en los pozos PCU-4 y PCU-5 para el análisis de junio del 2017 (Véanse figuras 91 y 93).

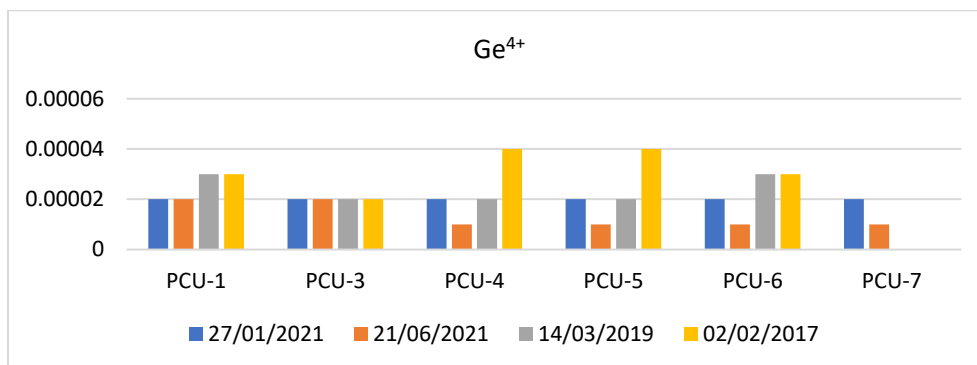


Figura 91. Concentraciones de Ge⁴⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

22. Fe³⁺

El Fe³⁺ es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre (5%), es utilizado para la obtención de aceros estructurales. La exposición al Fe³⁺ puede provocar conjuntivitis, coriorretinitis, y retinitis si contacta con los tejidos (ATSDR, 2021). El Fe³⁺ sobrepasó los LMP de las normativas ambientales en el muestreo de García 2017 y en el muestreo de enero del 2021 (Véanse figuras 92 y 93).

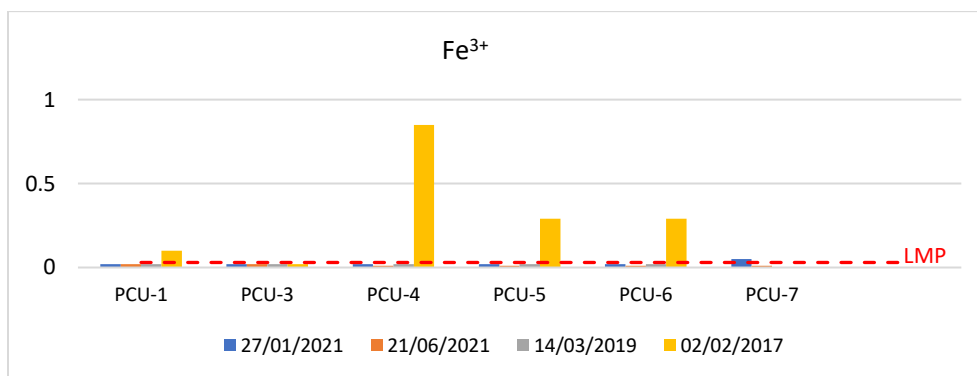
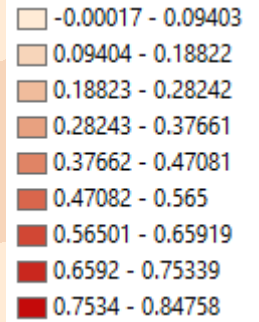
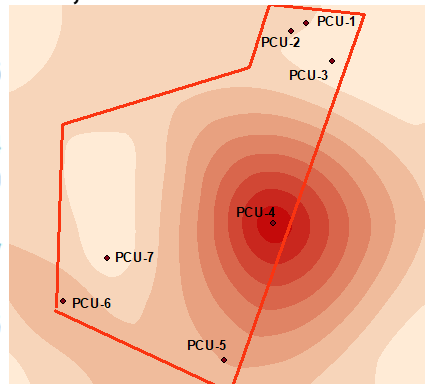
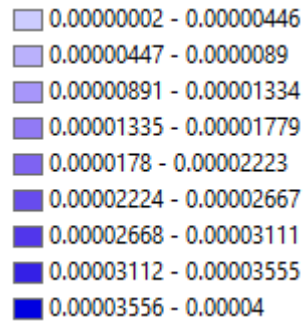
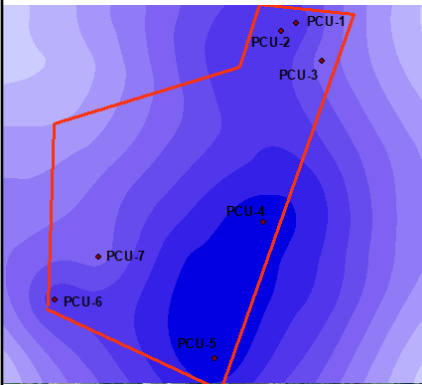
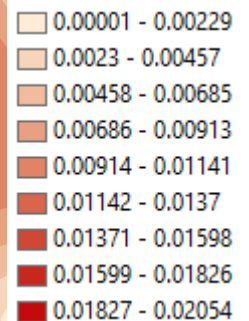
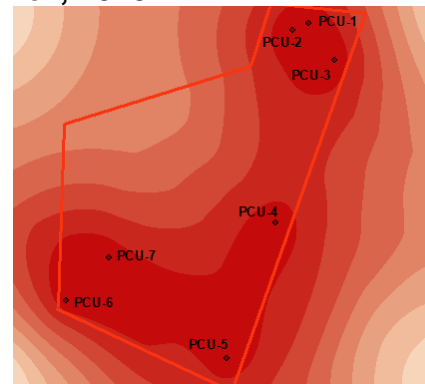
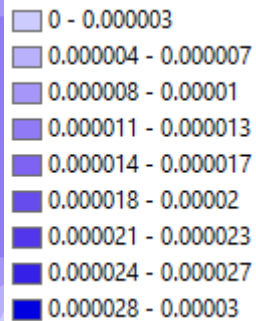
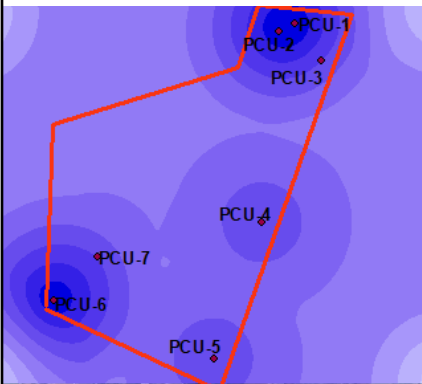


Figura 92. Concentraciones de Fe³⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

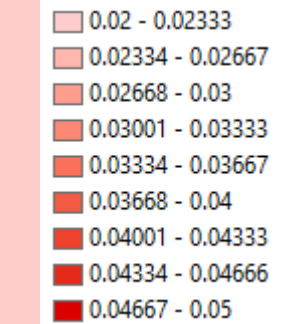
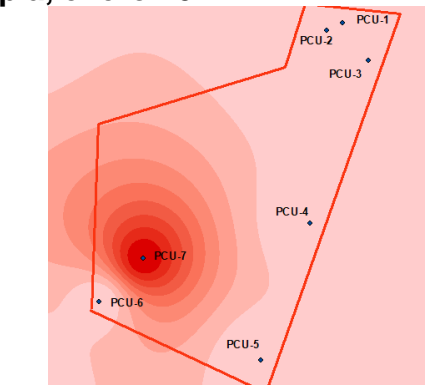
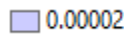
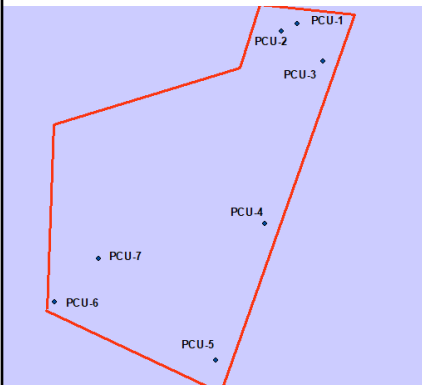
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

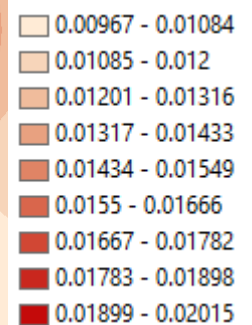
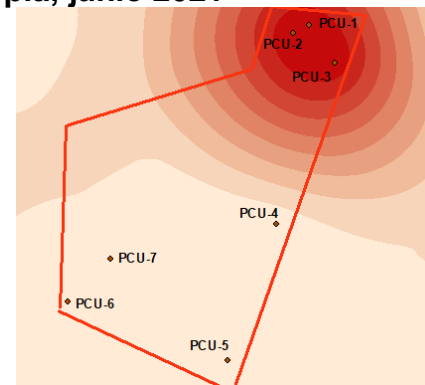
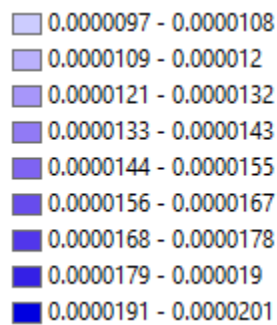
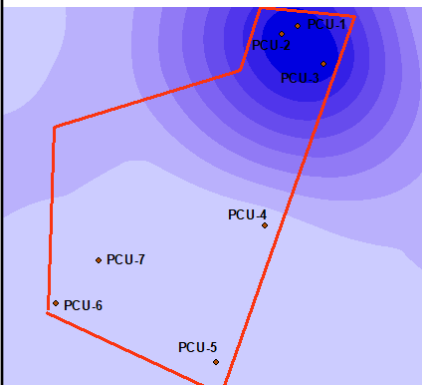


Figura 93. Mapas temáticos de distribución en representación del Ge⁴⁺ y del Fe³⁺ (elaboración propia, 2021).

23. Y³⁺

El Y³⁺ se utiliza comercialmente en la industria metálica para aleaciones y como "atrapador" para eliminar oxígeno e impurezas no metálicas de otros metales. Para las propiedades del metal y sus sales. La inhalación de Y³⁺ puede producir daños en los pulmones, así como aumentar las posibilidades de cáncer de pulmón. Las concentraciones más elevadas de Y³⁺ se registraron en los pozos PCU-4, PCU-5 y PCU-6 en el mes de junio del año 2017 (Véanse figuras 94 y 96).

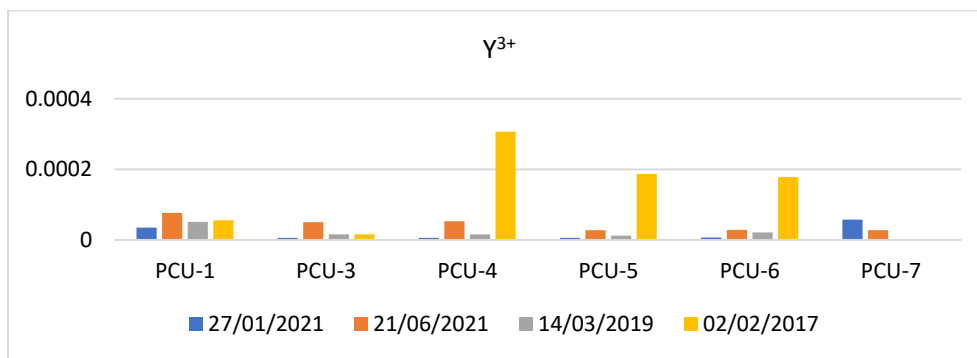


Figura 94. Concentraciones de Y³⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

24. La³⁺

El La³⁺ puede ser encontrado en televisiones, lámparas y cristales. Raramente se encuentra en la naturaleza. La exposición al La³⁺ por largo plazo puede causar embolias pulmonares (ATSDR, 2021). Las concentraciones más elevadas se detectaron en los análisis de junio del 2017, predominando su concentración en los pozos PCU-4, 5 y 6 (Véanse figuras 95 y 96).

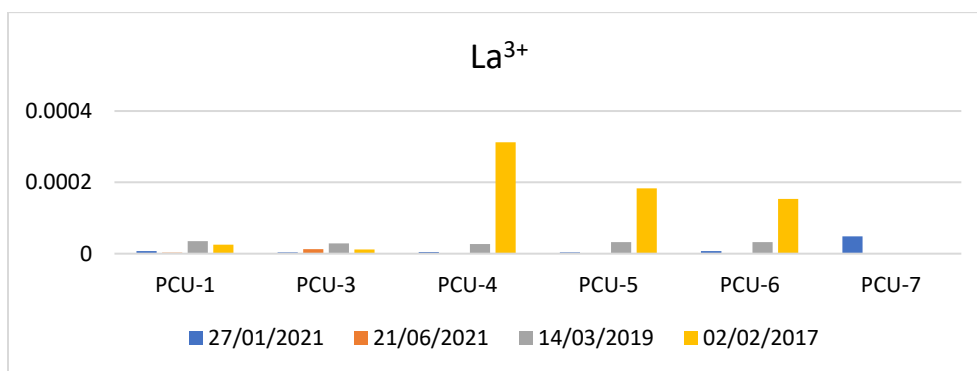
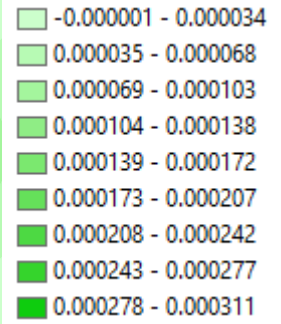
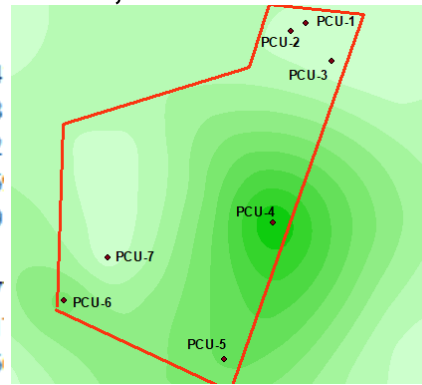
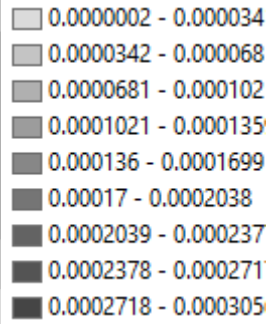
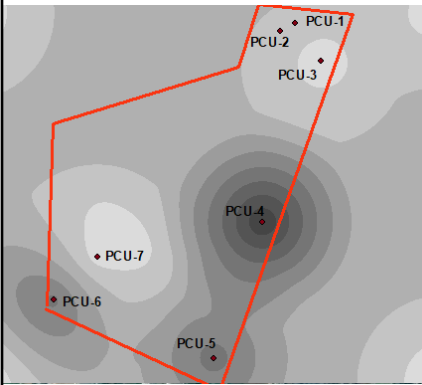
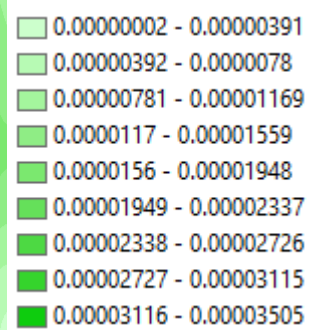
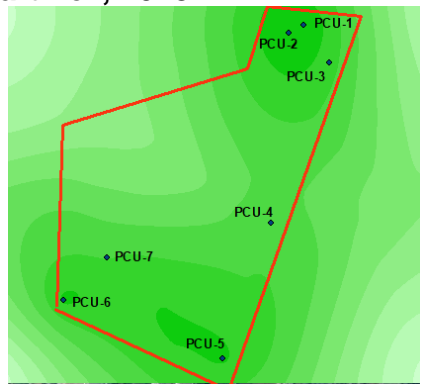
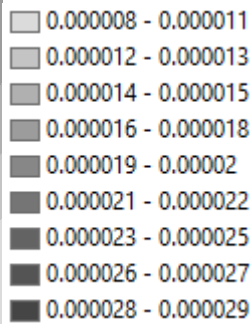
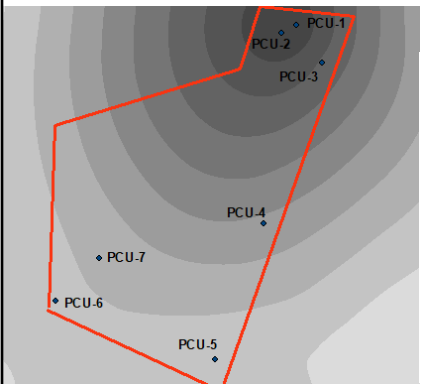


Figura 95. Concentraciones de La³⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

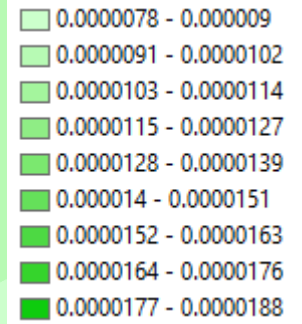
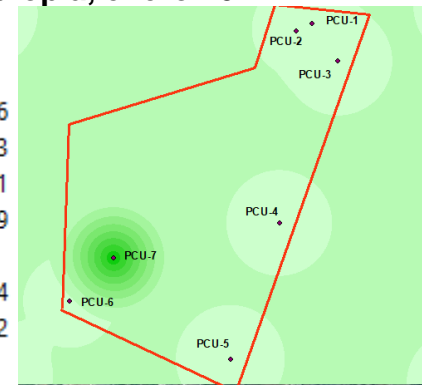
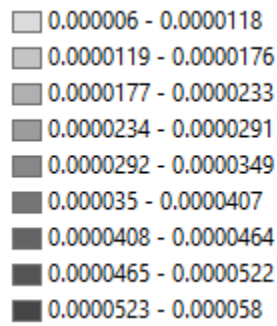
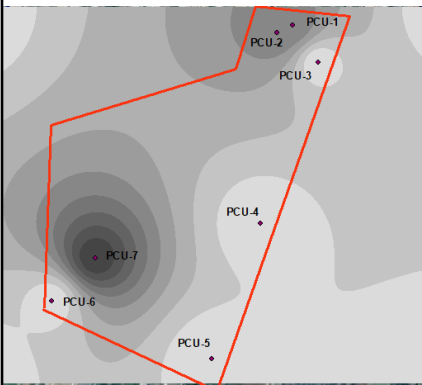
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

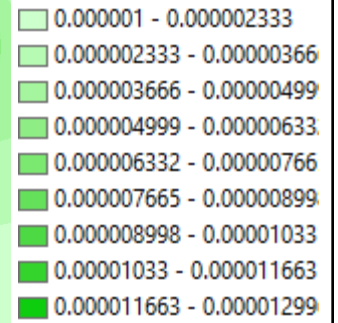
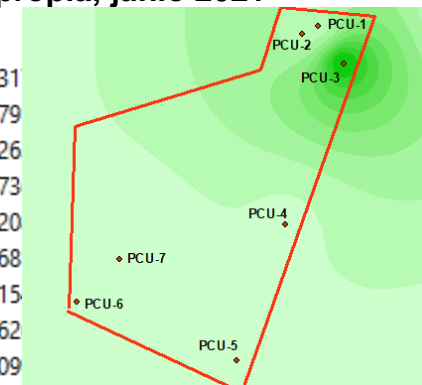
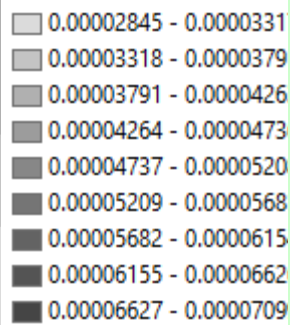
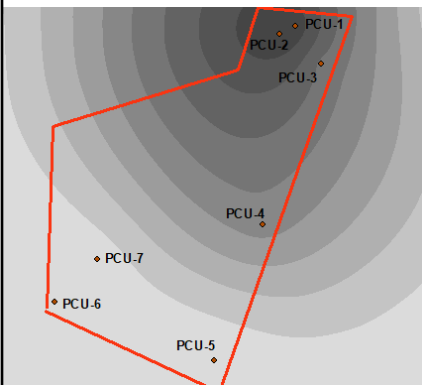


Figura 96. Mapas temáticos de distribución en representación del Y³⁺ y del La³⁺ (elaboración propia, 2021).

25. Li⁺

Es el metal sólido más ligero, es blando, de bajo punto de fusión y reactivo. El Li⁺ es corrosivo para los ojos, la piel y el tracto respiratorio. La inhalación de la sustancia puede causar edema pulmonar (ATSDR, 2021). Las concentraciones de Li⁺ más elevadas se encontraron en el pozo PCU-1 con valores de hasta 0.014 mg/L (Véanse figuras 97 y 99).

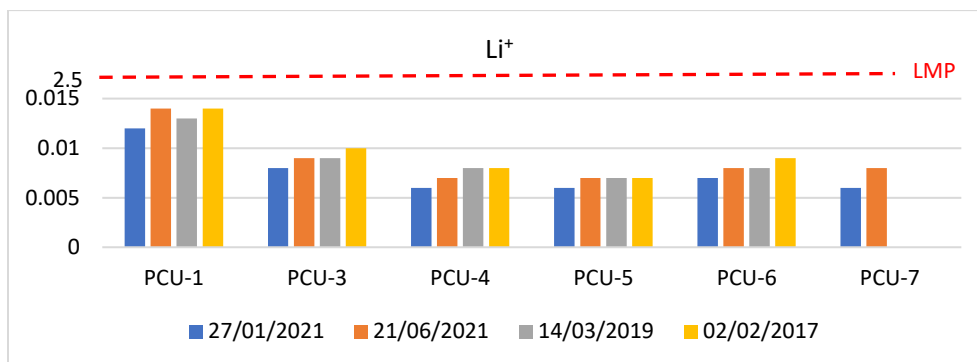


Figura 97. Concentraciones de Li⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

26. Lu³⁺

El Lu³⁺ puede ser encontrado en televisiones, lámparas y cristales. Raramente se encuentra en la naturaleza. La exposición al Lu³⁺ por largo plazo puede causar embolias pulmonares (ATSDR, 2021). Las concentraciones más elevadas se detectaron en los análisis de marzo del 2019 (Véanse figuras 98 y 99).

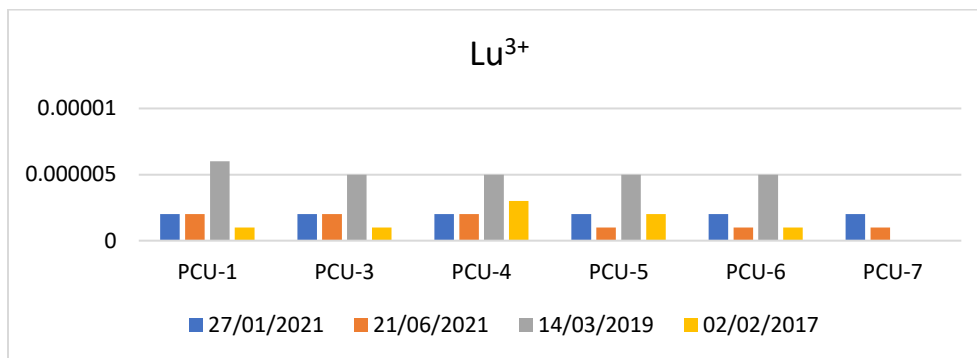
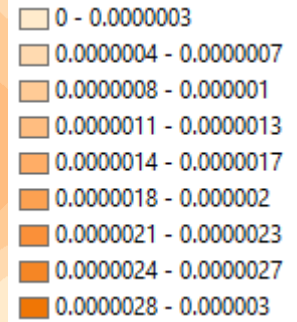
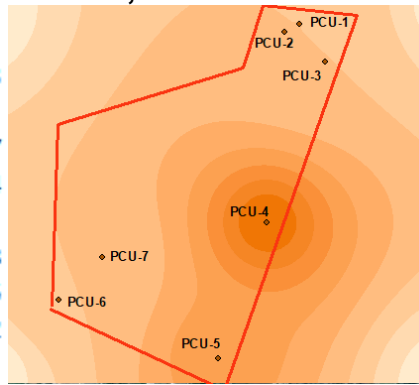
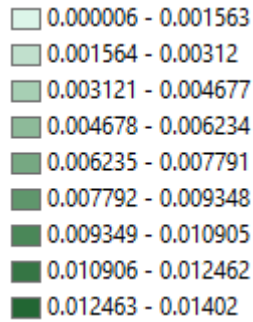
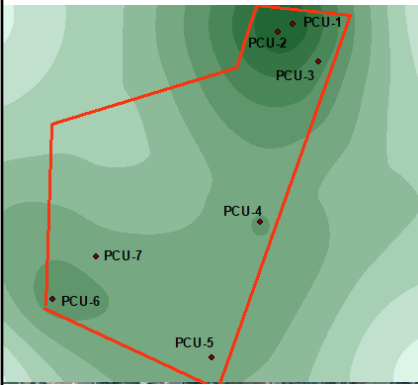
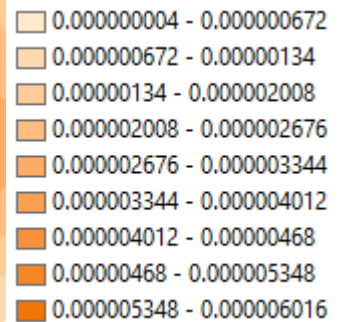
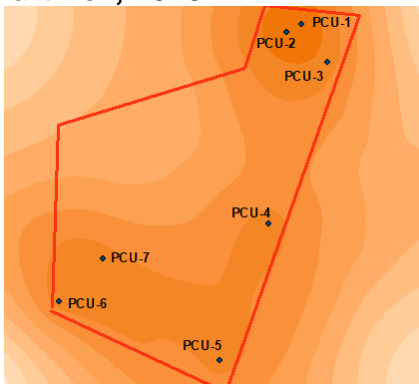
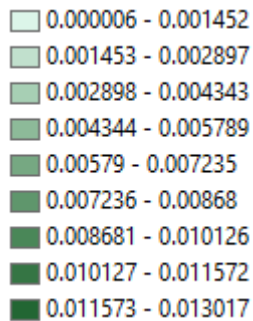
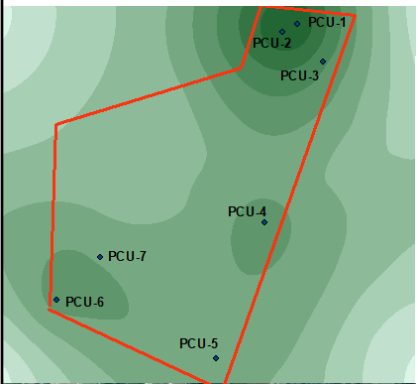


Figura 98. Concentraciones de Lu³⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

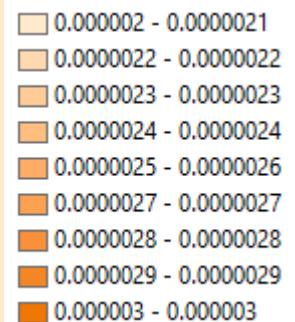
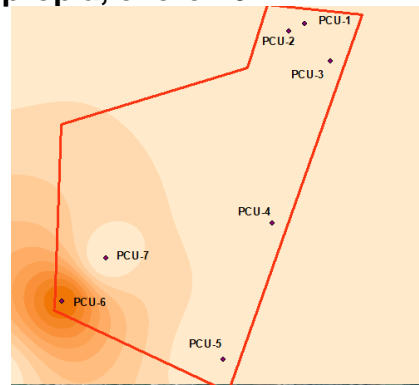
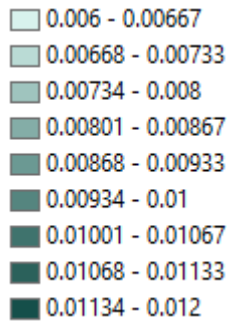
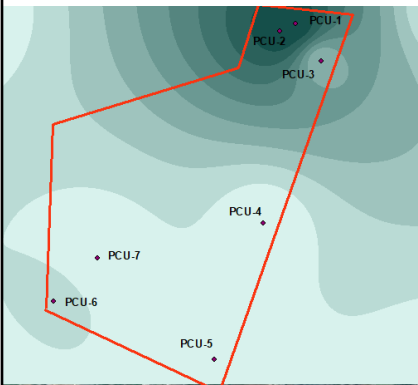
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

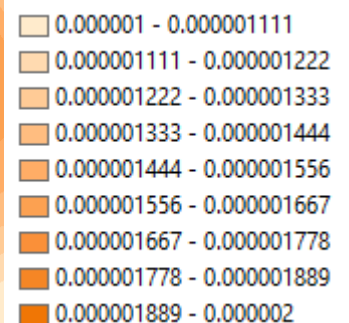
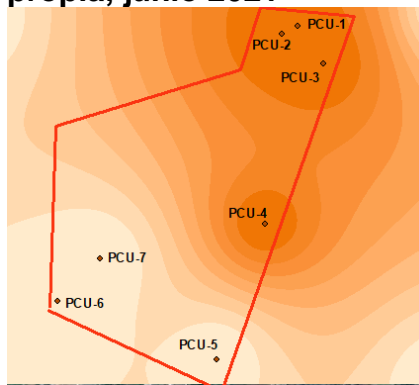
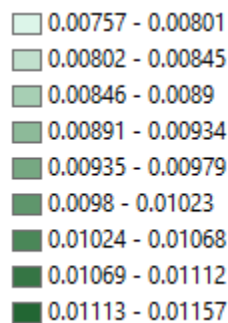
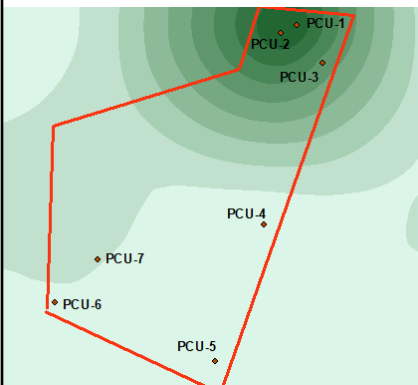


Figura 99. Mapas temáticos de distribución en representación del Li⁺ y del Lu³⁺ (elaboración propia, 2021).

27. Mg²⁺

Los compuestos de Mg²⁺ se utilizan mucho en la industria y la agricultura. El polvo de Mg²⁺ puede irritar las membranas mucosas y el tracto respiratorio superior (ATSDR, 2021). Las concentraciones de Mg²⁺ se mantuvieron similares en todos los análisis realizados con valores desde 24.0 hasta 37.9 mg/L, se logró observar una concentración más predominante en los pozos PCU-1 y PCU-3 (Véanse figuras 100 y 102).

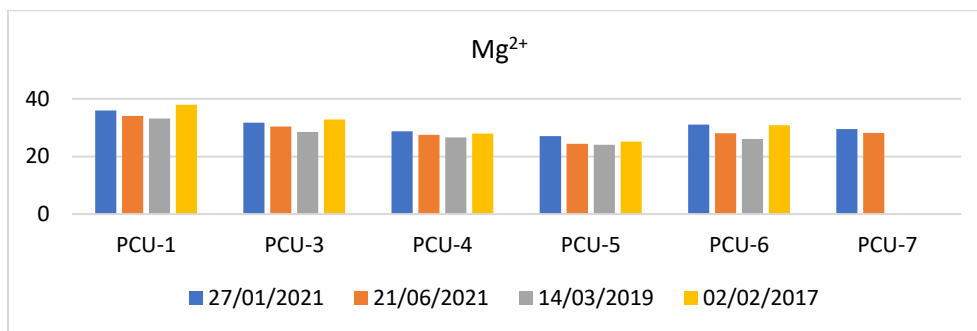


Figura 100. Concentraciones de Mg²⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

28. Mn²⁺

El Mn²⁺ se oxida con facilidad en el aire para formar una capa castaña de óxido. Los compuestos de Mn²⁺ tienen muchas aplicaciones en la industria. La exposición al Mn²⁺ puede llegar a ser importante, un síndrome que es causado por el Mn²⁺ tiene los siguientes síntomas: esquizofrenia, depresión, debilidad de músculos, dolor de cabeza e insomnio (ATSDR, 2021). El Mn²⁺ sobrepasó los LMP de las normativas ambientales en los muestreos de junio 2017 (PCU-4, PCU-5 y PCU-6), (Véanse figuras 101 y 102).

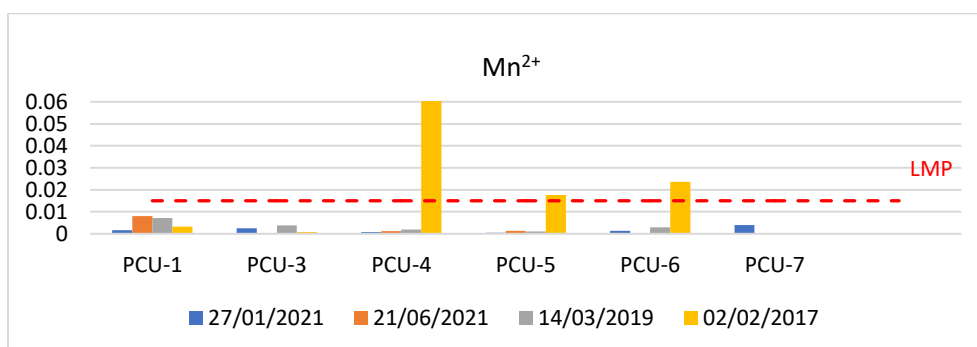
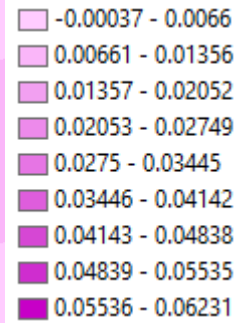
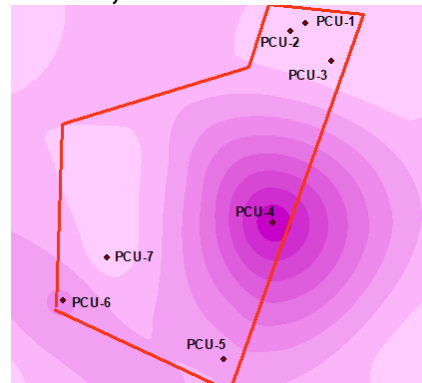
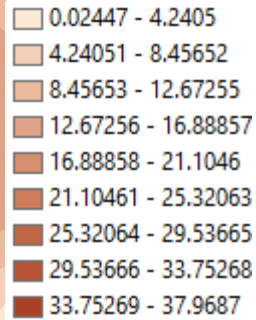
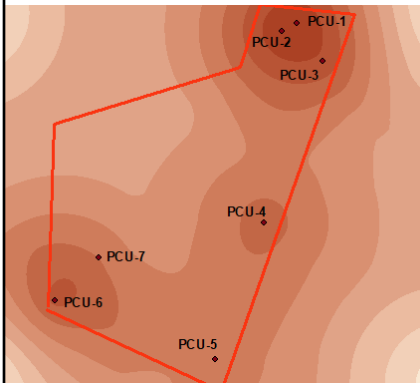
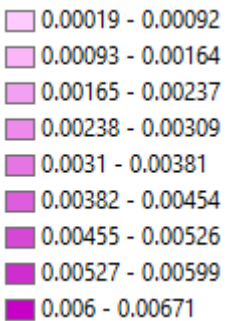
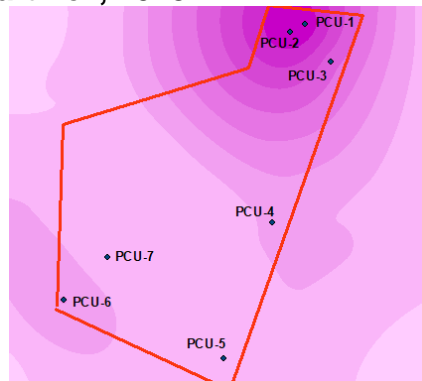
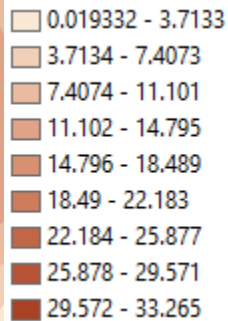
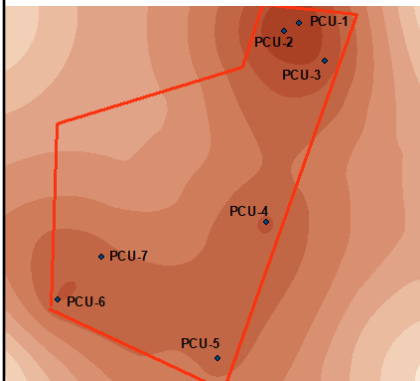


Figura 101. Concentraciones de Mn²⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

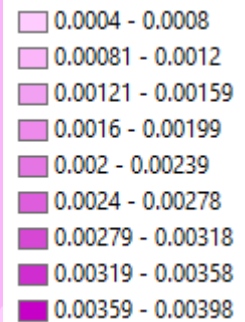
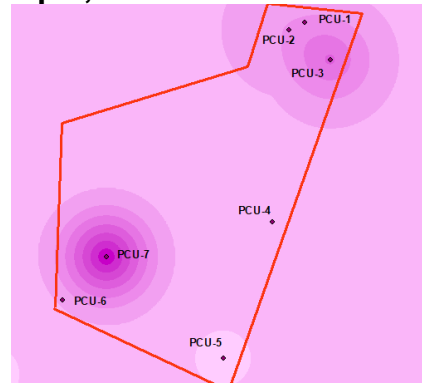
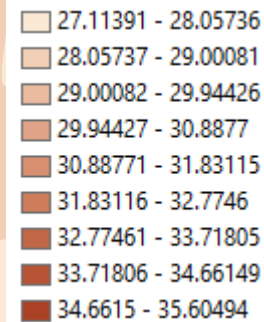
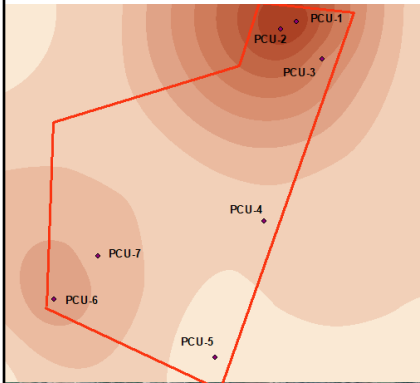
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

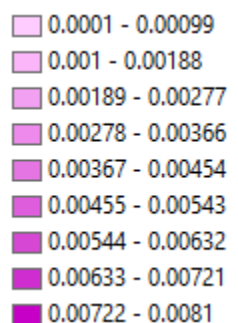
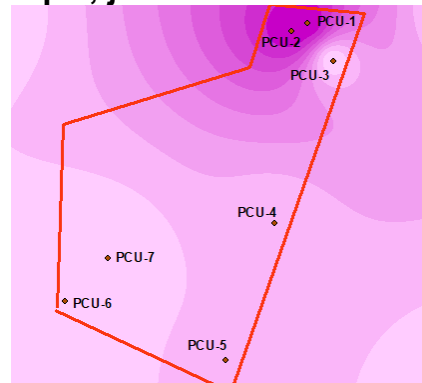
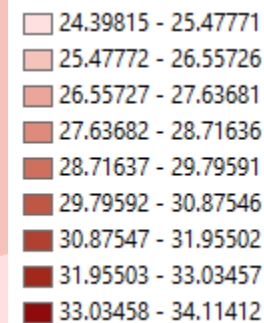
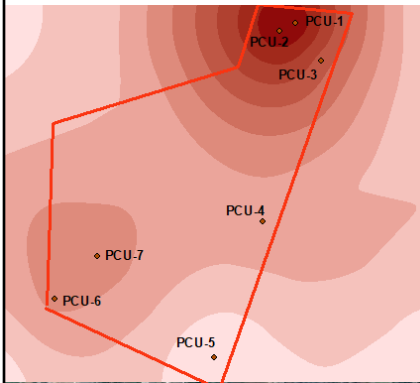


Figura 102. Mapas temáticos de distribución en representación del Mg^{2+} y del Mn^{2+} (elaboración propia, 2021).

29. Hg²⁺

El Hg²⁺ se usa en interruptores eléctricos, termómetros, barómetros, tacómetros, termostatos, etc. El Hg²⁺ tiene los siguientes efectos sobre los humanos: daño a las funciones del cerebro, daño al ADN, reacciones alérgicas, irritación de la piel, cansancio, dolor de cabeza, efectos negativos en la reproducción, daño en el esperma, defectos de nacimientos y abortos (ATSDR, 2021). Las concentraciones más elevadas de Hg²⁺ corresponden a los análisis de enero del 2021 y de marzo del 2019 (Véanse figuras 103 y 105).

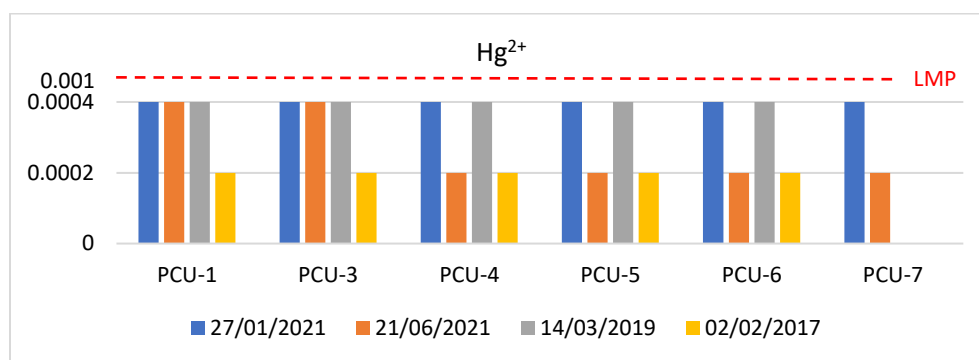


Figura 103. Concentraciones de Hg²⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

30. Nd³⁺

El Nd³⁺ puede ser encontrado en televisiones, lámparas y cristales. Raramente se encuentra en la naturaleza. La exposición al Nd³⁺ por largo plazo puede causar embolias pulmonares (ATSDR, 2021). Las concentraciones más elevadas se detectaron en los análisis de junio del 2017 en los pozos PCU-4, PCU-5 y PCU-6 (Véanse figuras 104 y 105).

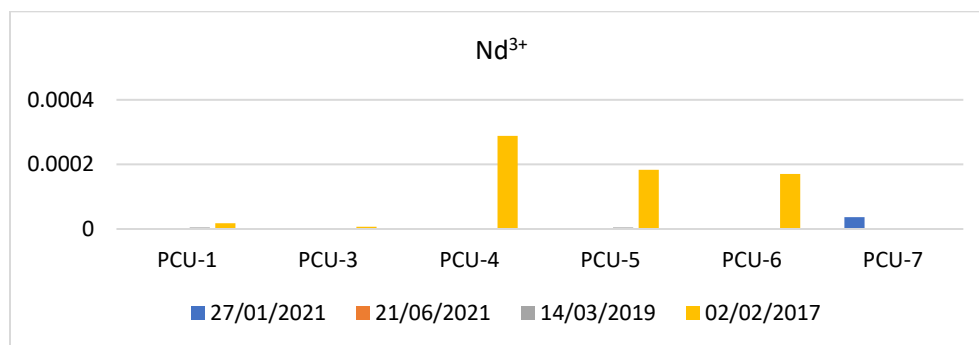
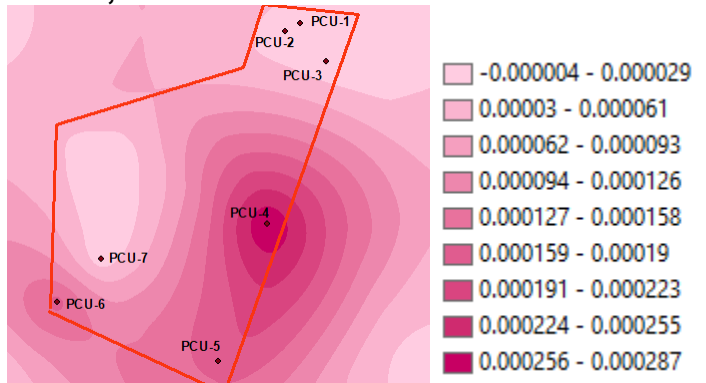
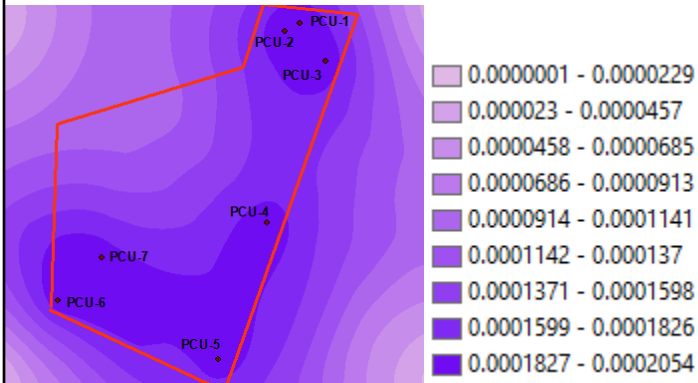
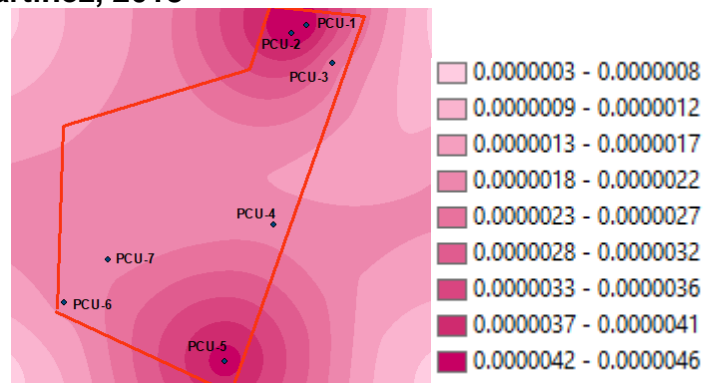
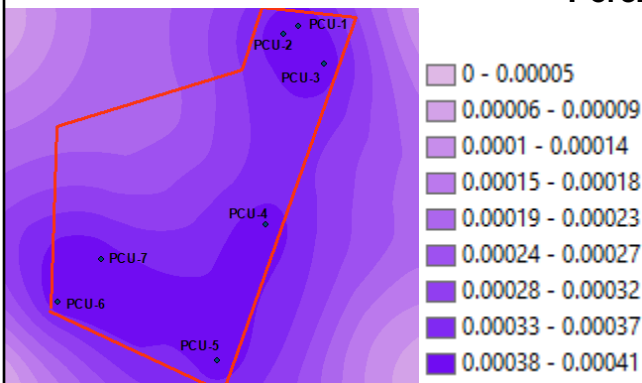


Figura 104. Concentraciones de Nd³⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

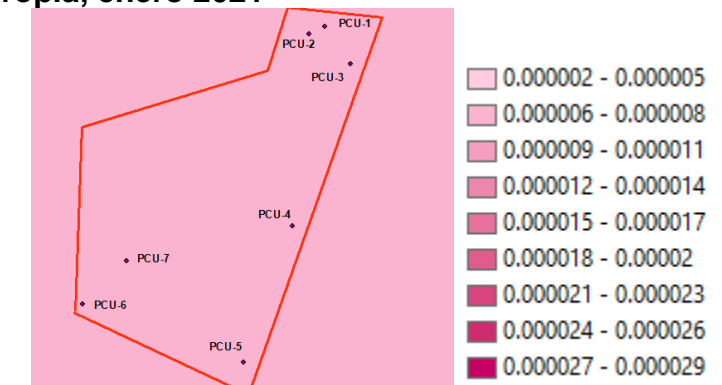
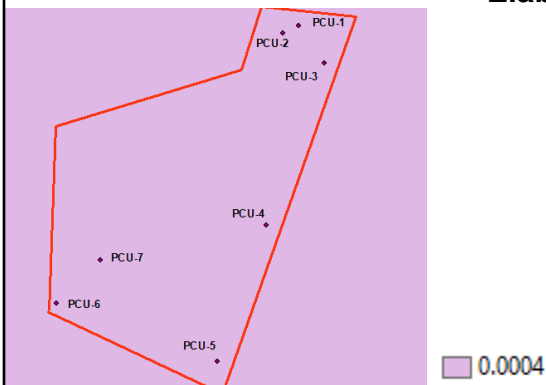
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

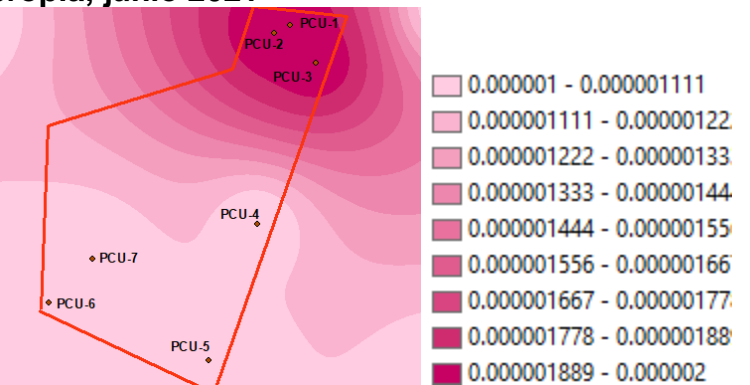
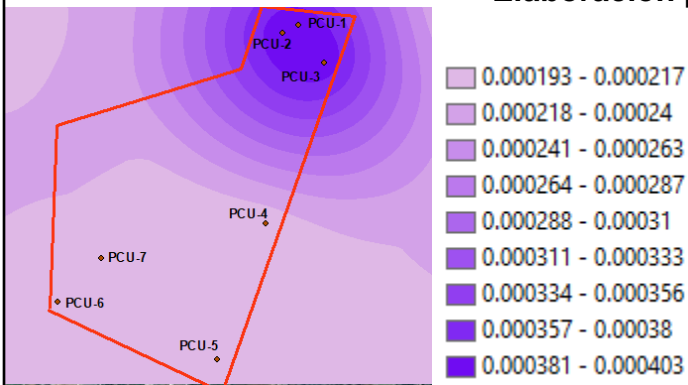


Figura 105. Mapas temáticos de distribución en representación del Hg²⁺ y del Nd³⁺ (elaboración propia, 2021).

31. Mo⁶⁺

La mayor parte del Mo⁶⁺ proviene de minas donde su recuperación es el objetivo primario de la operación. El Mo⁶⁺ es altamente tóxico. Se ha informado evidencia de disfunción hepática en trabajadores expuestos a Mo⁶⁺ (ATSDR, 2021). El Mo⁶⁺ se encontró en cantidades muy similares en todos los muestreos, sin embargo, en junio del 2017 en el pozo PCU-4 se encontró una concentración ligeramente elevada (Véanse figuras 106 y 108).

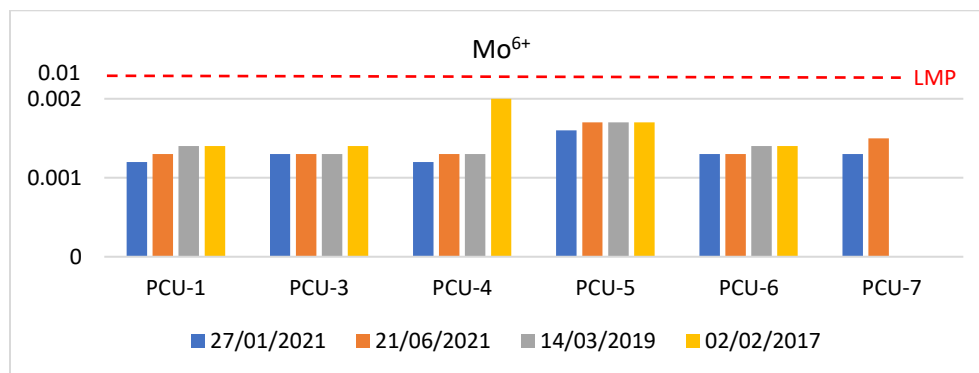


Figura 106. Concentraciones de Mo⁶⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

32. Nb⁵⁺

La mayor parte del Nb⁵⁺ se usa en aceros inoxidables especiales y en aleaciones superconductoras. El Nb⁵⁺, cuando es inhalado, es retenido en los pulmones, y secundariamente en los huesos. Las concentraciones más elevadas correspondieron al muestreo de junio del 2017 (gráfica 40, figura 65). Las concentraciones más elevadas de Nb⁵⁺ corresponden a los análisis realizados en junio del 2017 (Véanse figuras 107 y 108).

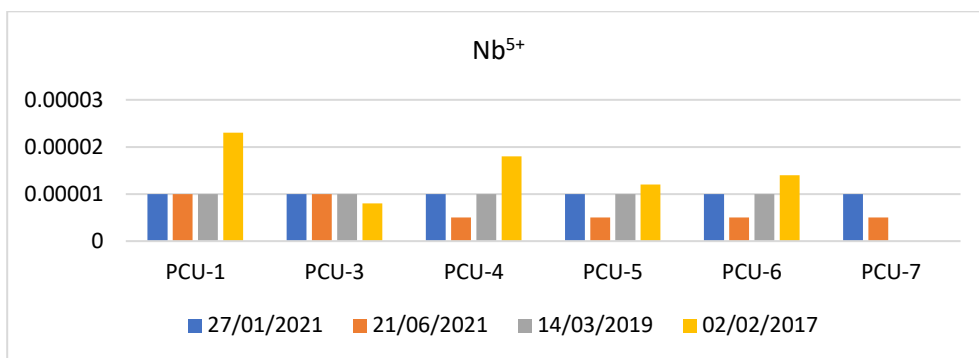
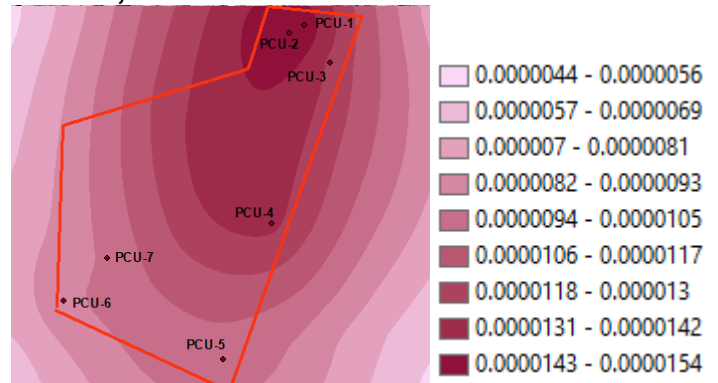
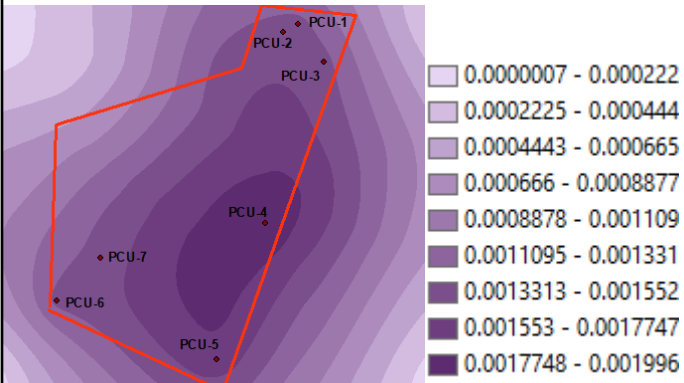
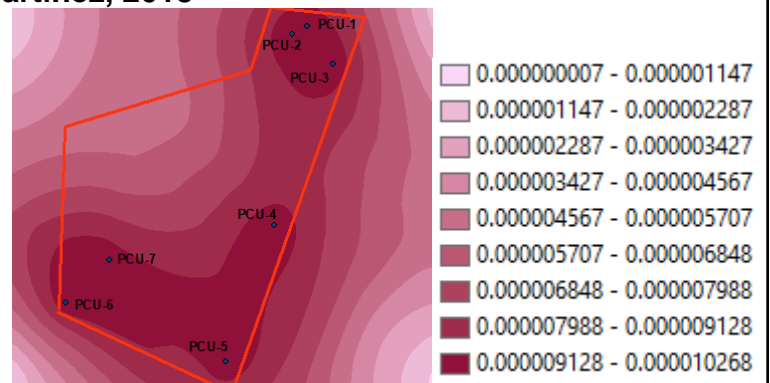
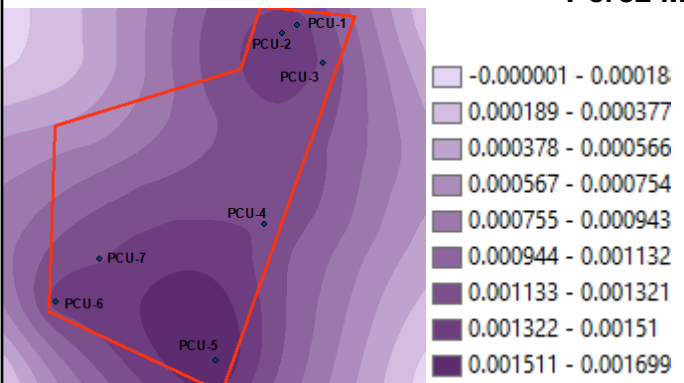


Figura 107. Concentraciones de Nb⁵⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

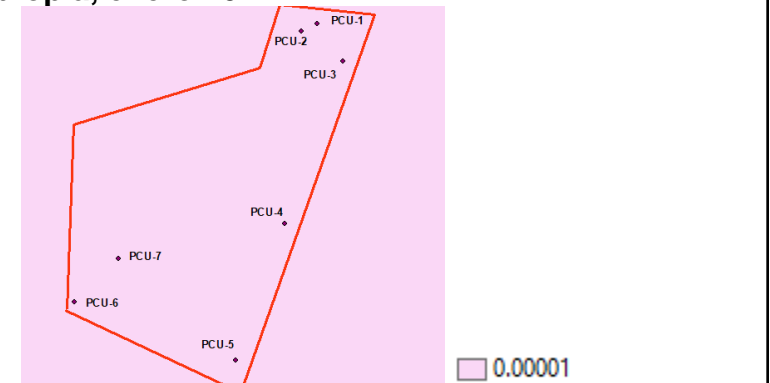
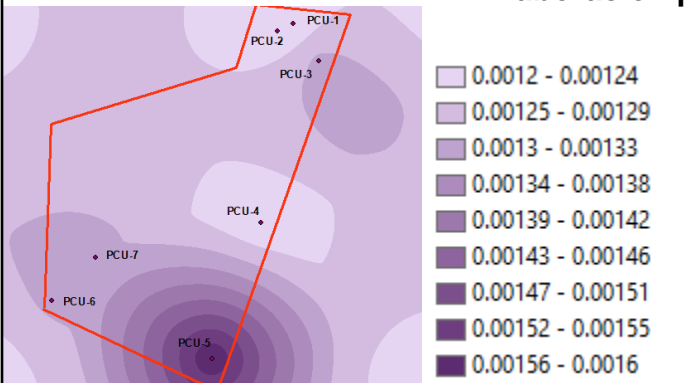
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

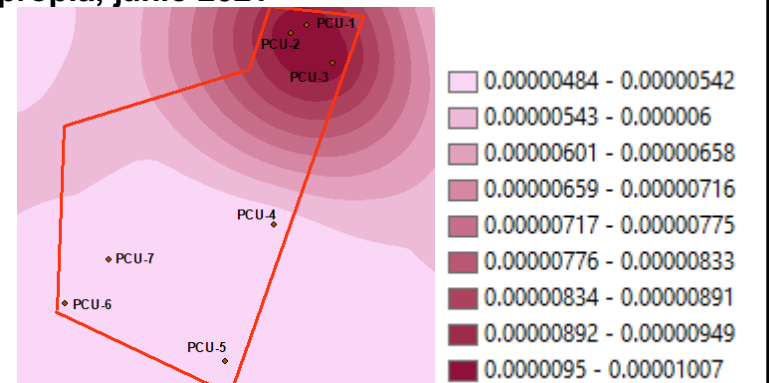
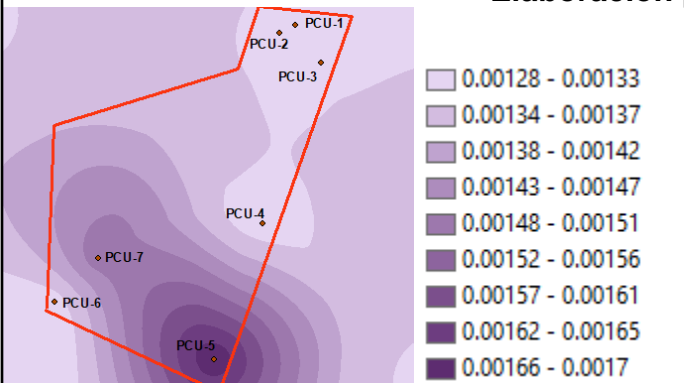


Figura 108. Mapas temáticos de distribución en representación del Mo⁶⁺ y del Nb⁵⁺ (elaboración propia, 2021).

33. Ni³⁺

La mayor parte del Ni³⁺ se emplea en el acero inoxidable y otras aleaciones resistentes a la corrosión. La exposición a altas cantidades de Ni³⁺ tiene las consecuencias: probabilidad de desarrollar cáncer de pulmón, nariz, laringe y próstata (ATSDR, 2021). La concentración de Ni³⁺ más elevada se obtuvo en junio del 2017 en el pozo PCU-1 con 0.018 mg/L (Véanse figuras 109 y 111).

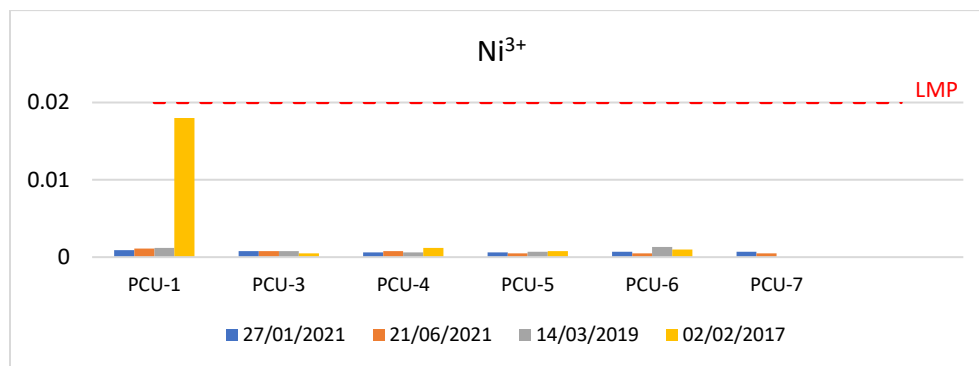


Figura 109. Concentraciones de Ni³⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

34. K⁺

El K⁺ es un elemento muy abundante y es el séptimo entre todos los elementos de la corteza terrestre; el 2.59% de ella corresponde a K⁺ en forma combinada. Cuando nuestros riñones no funcionan bien se puede dar la acumulación de K⁺. Esto puede llevar a cabo una perturbación en el ritmo cardiaco (ATSDR, 2021). La concentración más elevada reportada corresponde al muestreo de junio del 2021 en el pozo PCU-1 (Véanse figuras 110 y 111).

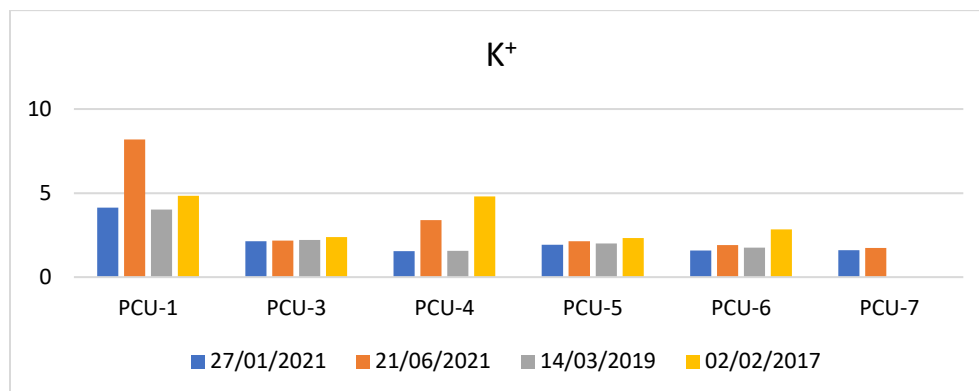
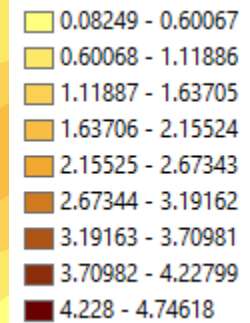
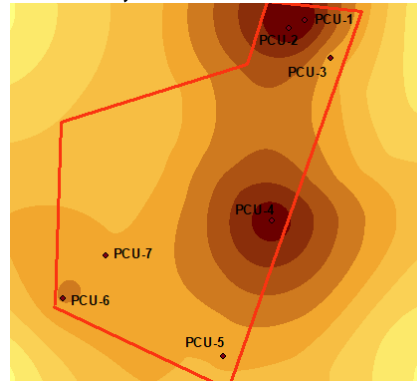
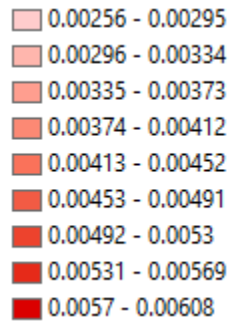
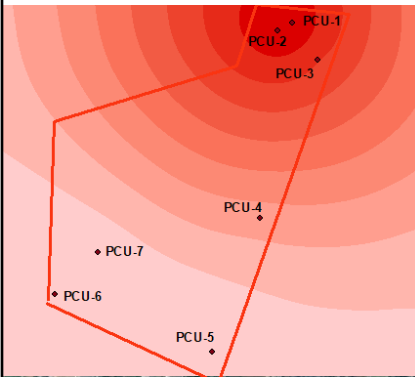
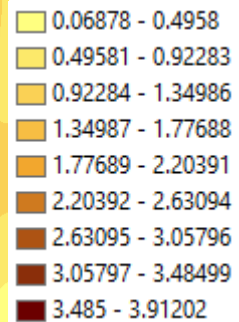
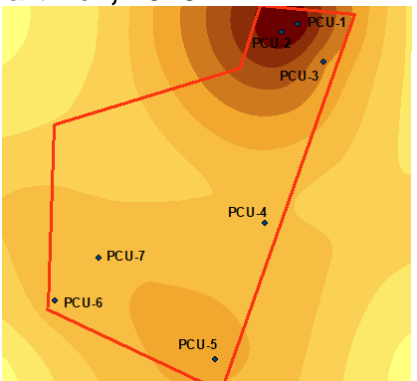
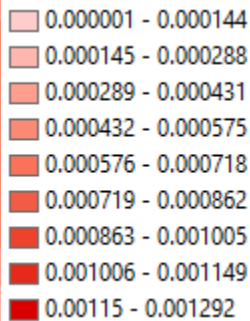
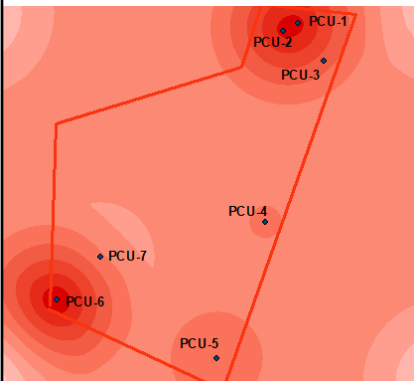


Figura 110. Concentraciones de K⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

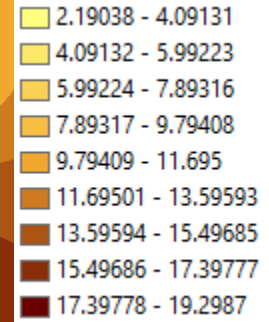
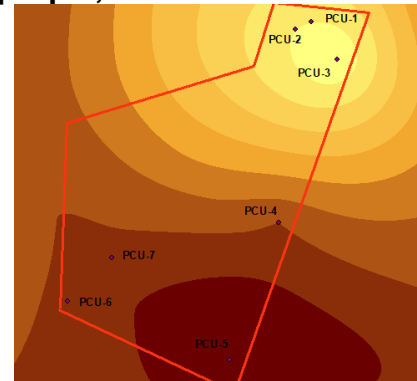
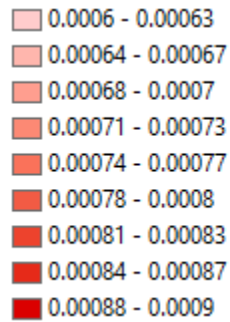
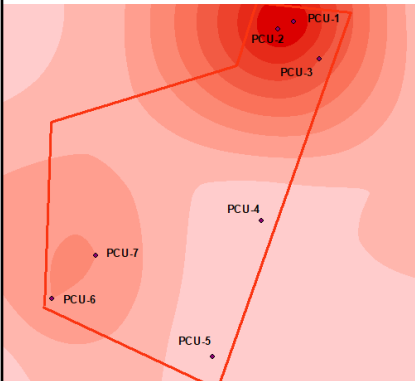
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

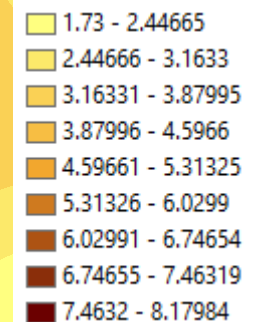
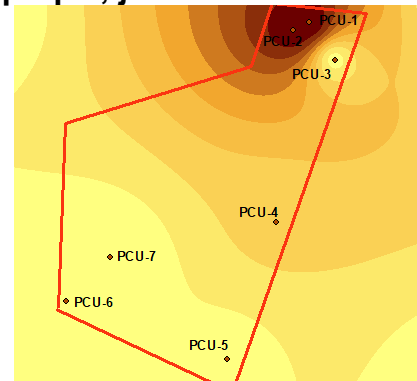
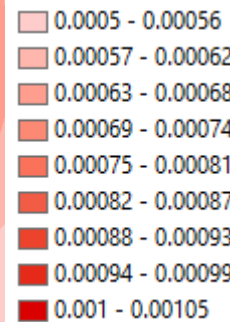
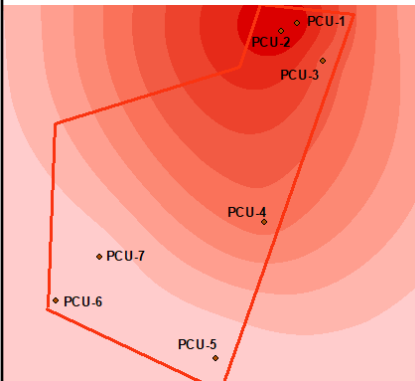


Figura 111. Mapas temáticos de distribución en representación del Níquel y del Potasio (elaboración propia, 2021).

35. Ag⁺

La Ag⁺, se utiliza en puntos de contacto eléctricos. Los compuestos de Ag⁺ pueden ser absorbidos lentamente por los tejidos corporales, con la consecuente pigmentación negruzca de la piel (ATSDR, 2021). Las concentraciones de Ag⁺ de manera general fueron bajas, las concentraciones más elevadas se encontraron en los dos muestreos más recientes (Véanse figuras 112 y 114).

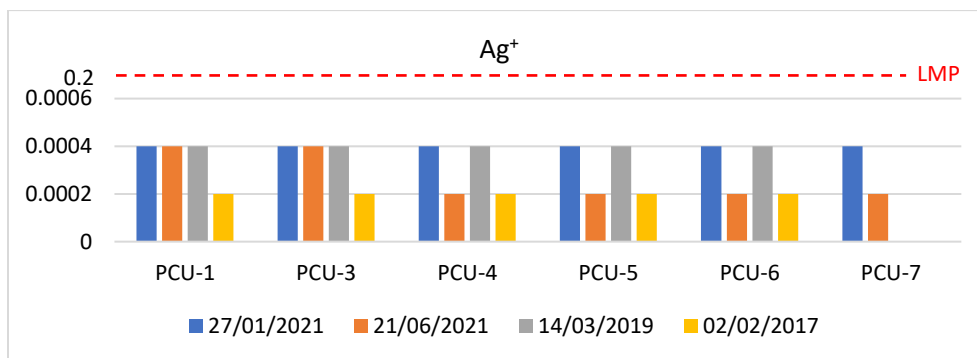


Figura 112. Concentraciones de Ag⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

36. Rb⁺

El Rb⁺ es un ion metálico alcalino, reactivo, ligero y de bajo punto de fusión. La mayor parte de los usos de Rb⁺ metálico y de sus compuestos son los mismos que los del Cs⁺ y sus compuestos. El ion metálico se utiliza en la manufactura de tubos de electrones, y las sales en la producción de vidrio y cerámica (ATSDR, 2021). La concentración más elevada de Rb⁺ detectada corresponde al PCU-4 en el muestreo de junio del 2017 (Véanse figuras 113 y 114).

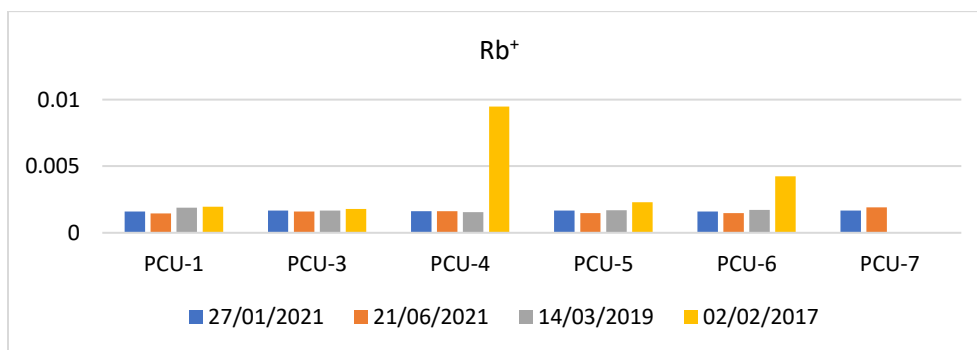
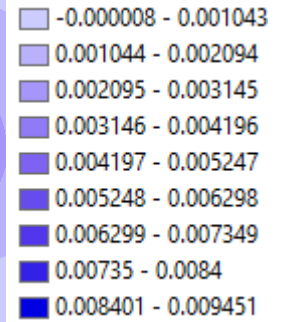
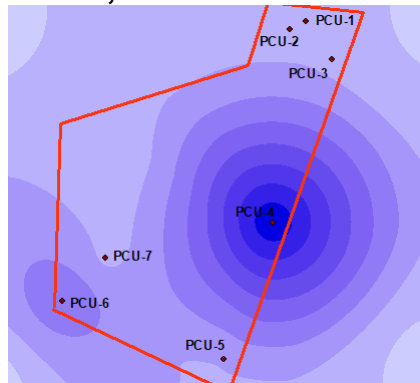
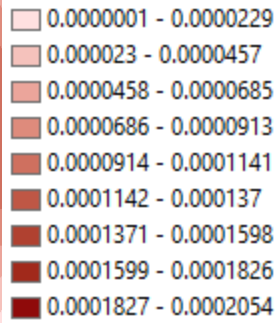
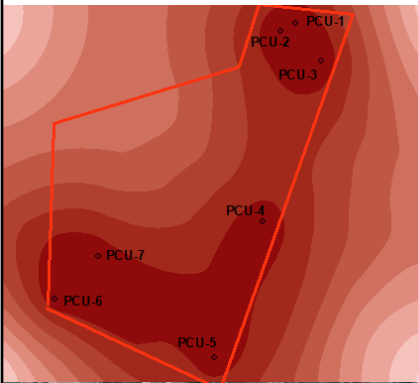
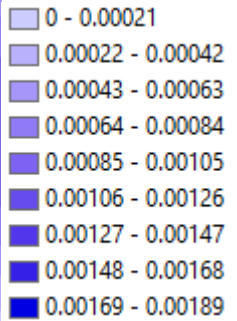
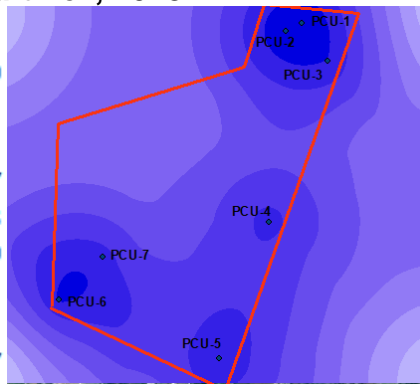
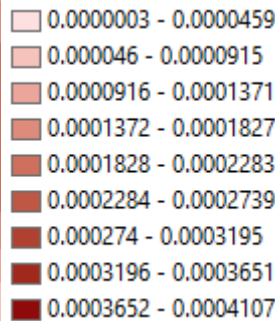
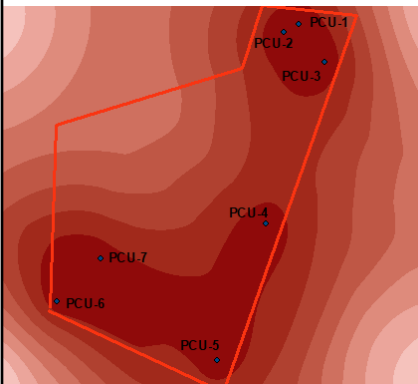


Figura 113. Concentraciones de Rb⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

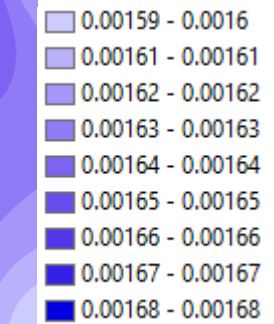
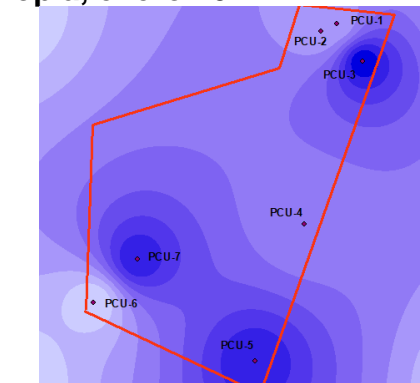
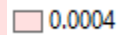
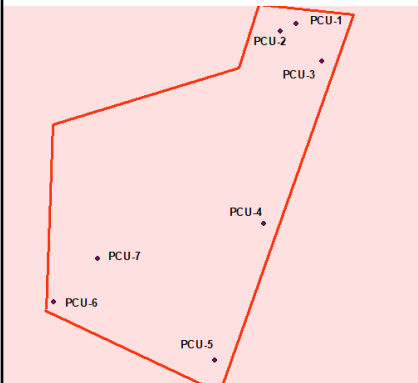
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

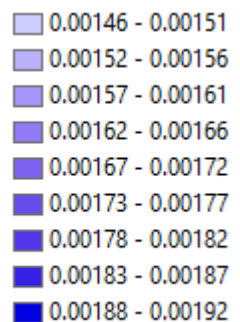
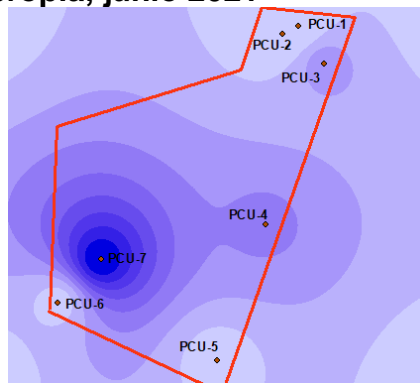
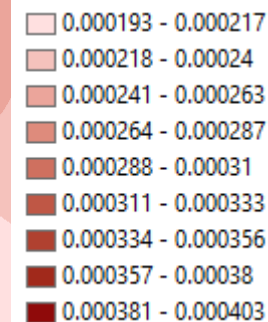
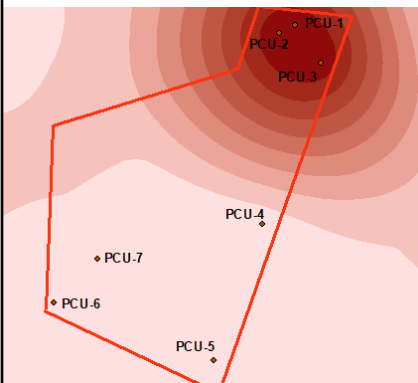


Figura 114. Mapas temáticos de distribución en representación de la Ag⁺ y del Rb⁺ (elaboración propia, 2021).

37. Se⁶⁺

Es usado como pigmento, pinturas, barnices, vidrio y cerámica y tintas. El Se⁶⁺ podría terminar en las aguas subterráneas o superficiales. Los efectos sobre la salud pueden variar de pelo quebradizo y uñas deformadas, a sarpullidos, calor, hinchamiento de la piel y dolores agudos (ATSDR, 2021). Las concentraciones de Se⁶⁺ fueron desde 0.0014 hasta 0.0041mg/L (Véanse figuras 115 y 117).

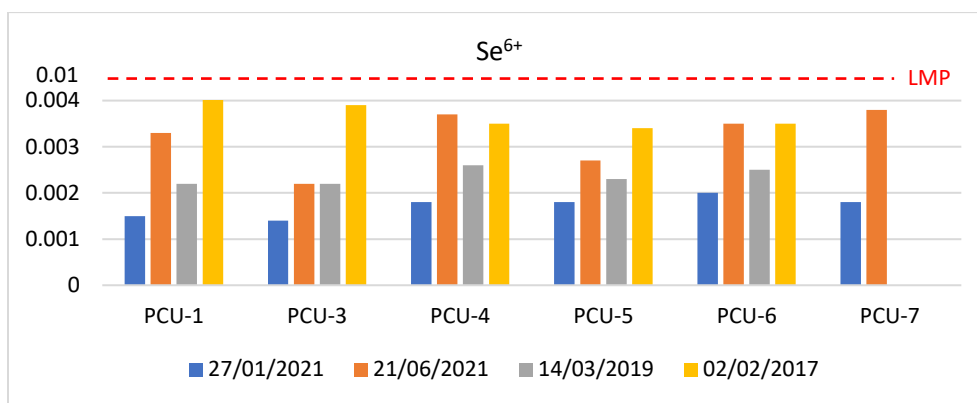


Figura 115. Concentraciones de Se⁶⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

38. Si⁴⁺

La Si⁴⁺ se emplea como integrante de aleaciones para dar mayor resistencia a otros iones metálicos. El polvo de Si⁴⁺ no produce efectos tóxicos cuando las exposiciones se mantienen por debajo de los LMP (ATSDR, 2021). La Si⁴⁺ en el agua se concentró en distintos puntos de la zona de estudio para los 4 muestreos realizados, sin embargo, se observó una concentración más constante en los pozos PCU-1 y PCU-3 (Véanse figuras 116 y 117).

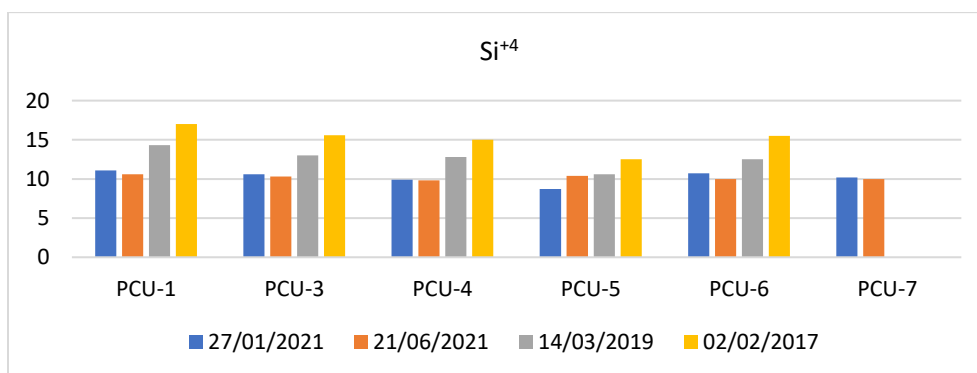
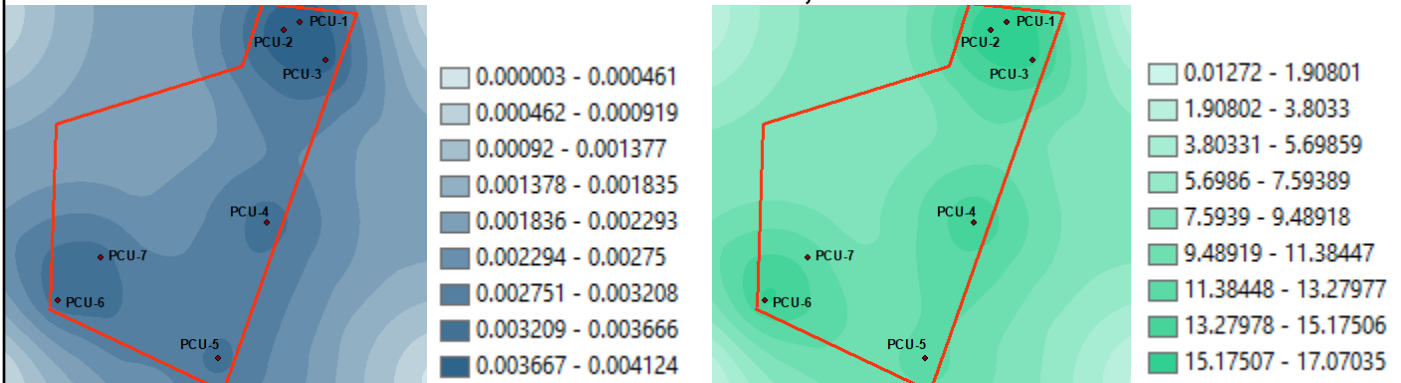
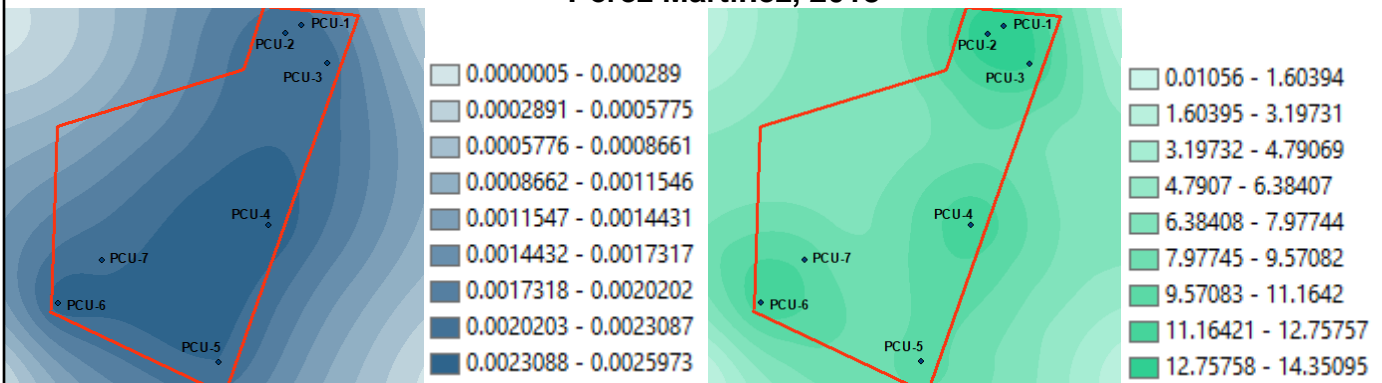


Figura 116. Concentraciones de Si⁴⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

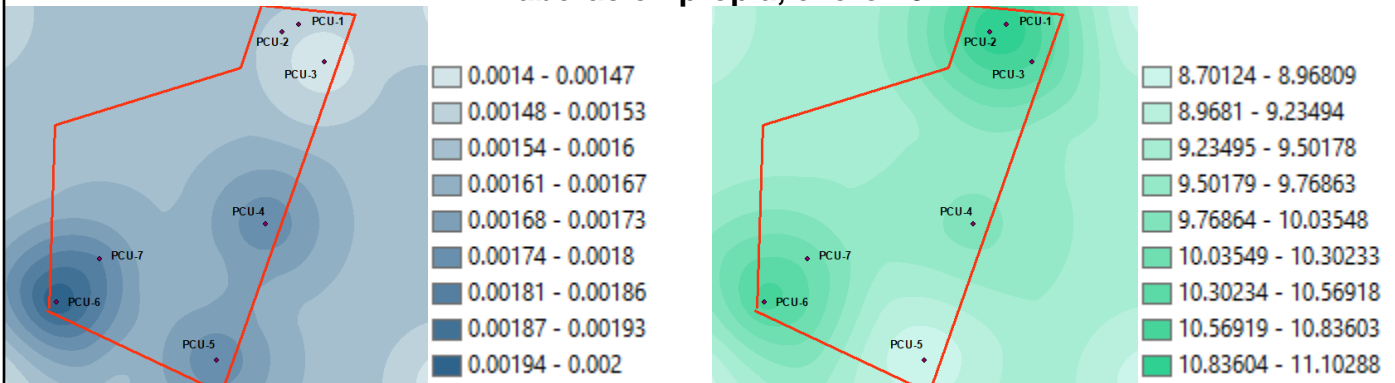
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

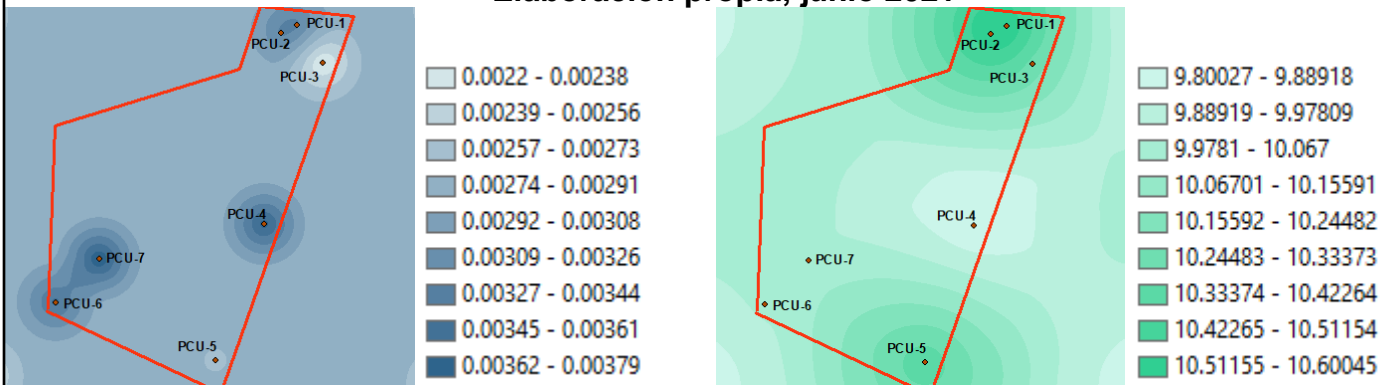


Figura 117. Mapas temáticos de distribución en representación del Se⁶⁺ y de la Si⁴⁺ (elaboración propia, 2021).

39. Na⁺

El Na⁺ ocupa el sexto lugar por su abundancia entre todos los elementos de la corteza terrestre, que contiene el 2.83% de Na⁺ en sus formas combinadas. El Na⁺ es, después del Cl⁻, el segundo elemento más abundante en solución en el agua de mar (ATSDR, 2021). Las concentraciones más elevadas de Na⁺ se obtuvieron en los pozos PCU-1 y PCU-3 (Véanse figuras 118 y 120).

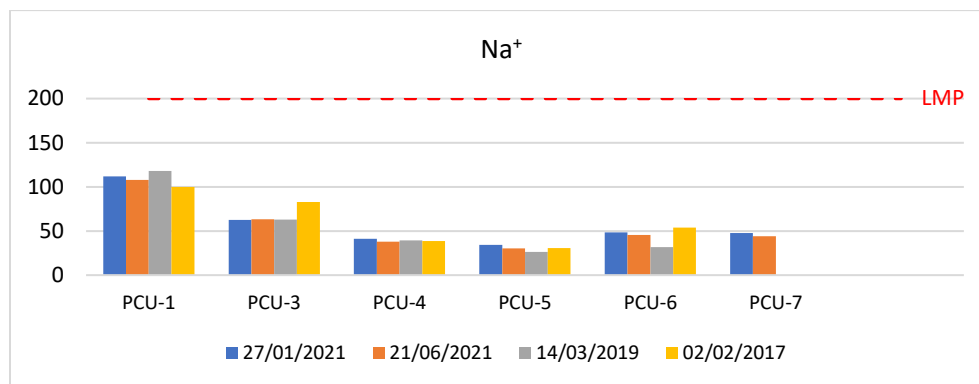


Figura 118. Concentraciones de Na⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

40. Te⁶⁺

El Te⁶⁺ es utilizado como aditivo del acero para incrementar su ductilidad, como abrillantador, como aditivo en catalizadores, como material colorante de vidrios y como aditivo del Pb⁴⁺ para incrementar su fuerza y resistencia a la corrosión. La ingestión incluso en pequeñas cantidades provoca un terrible mal aliento y un espantoso olor corporal (ATSDR, 2021). Las concentraciones más elevadas de Te⁶⁺ se obtuvieron en el PCU-1 y PCU-3 (Véanse figuras 119 y 120).

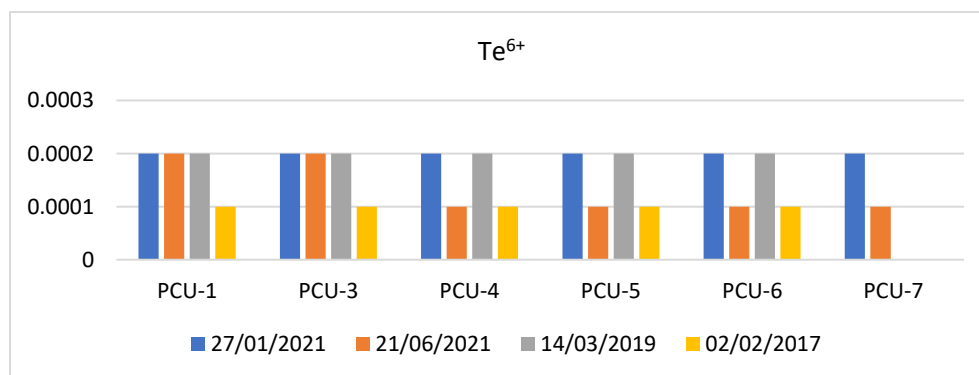
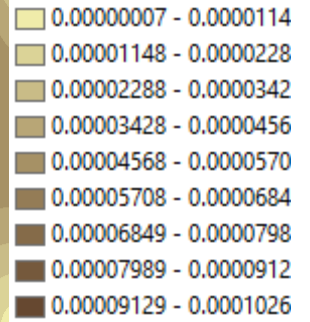
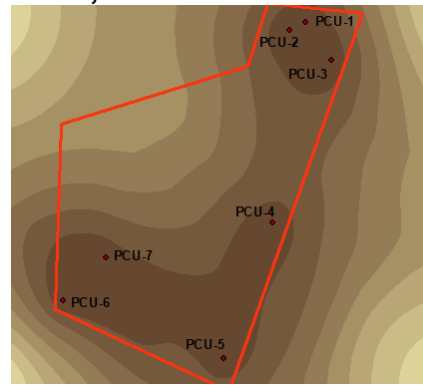
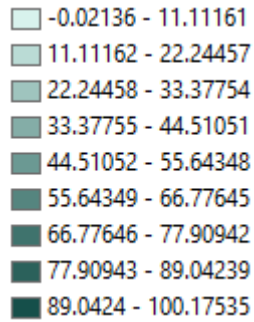
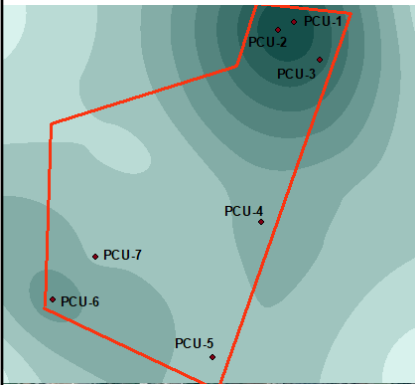
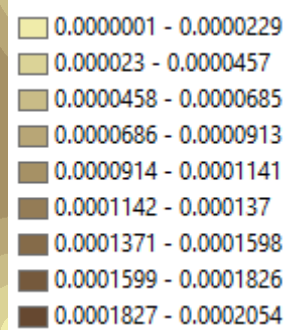
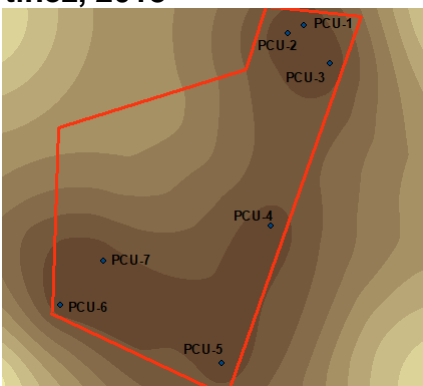
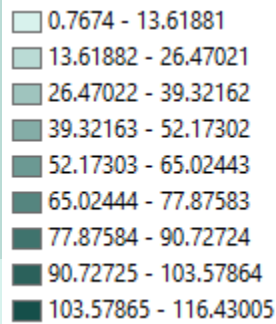
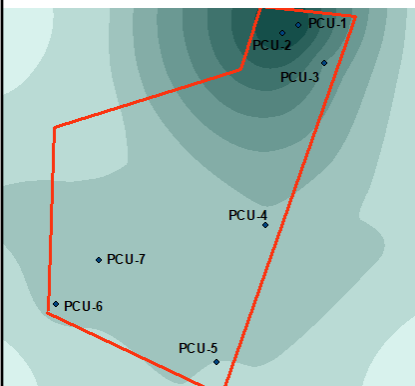


Figura 119. Concentraciones de Te⁶⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

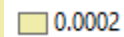
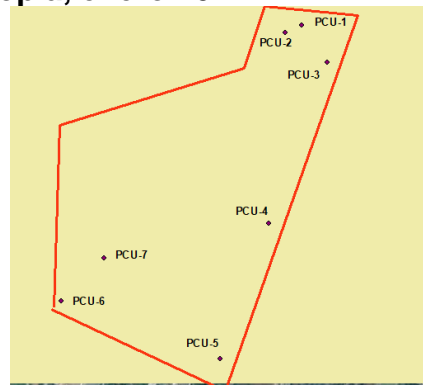
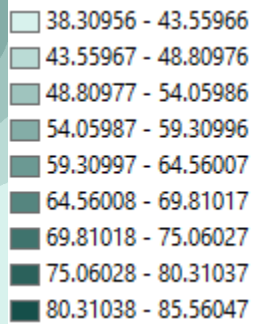
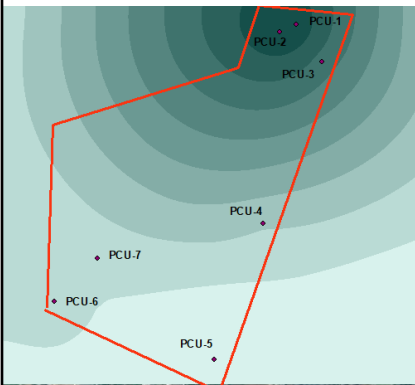
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

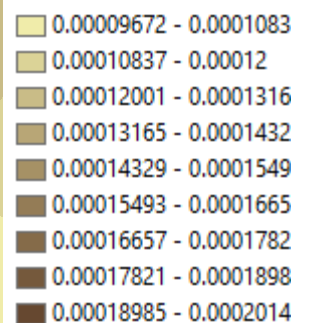
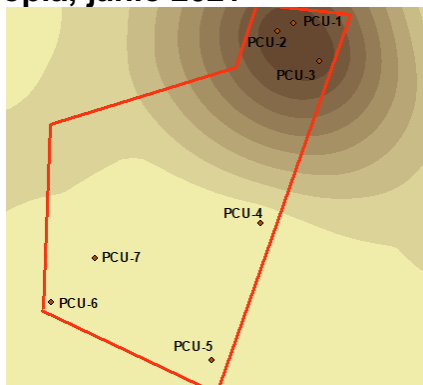
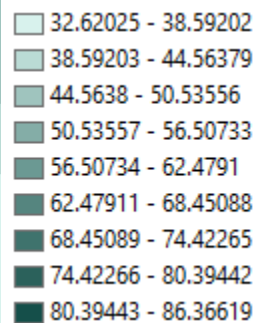
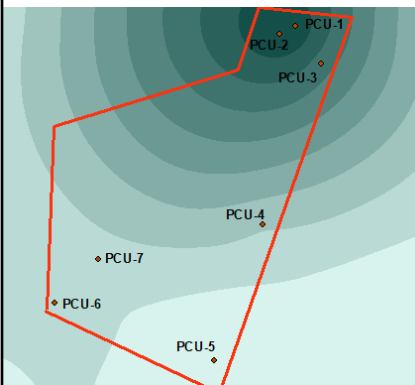


Figura 120. Mapas temáticos de distribución en representación del Na⁺ y del Te⁶⁺ (elaboración propia, 2021).

41. Ti^{3+}

El Ti^{3+} ocurre de forma natural en pequeñas cantidades. No es muy usado por los humanos, solamente en venenos de rata y como sustancias en las industria electrotécnica e industrias químicas. Estas aplicaciones pueden causar exposiciones para los humanos a sustancias del Ti^{3+} El cuerpo humano absorbe el Ti^{3+} muy eficientemente, especialmente a través de la piel, los órganos respiratorios y el tracto digestivo (ATSDR, 2021). Las concentraciones de Ti^{3+} predominaron en los pozos PCU-1 y PCU-2 (Véanse figuras 121 y 123).

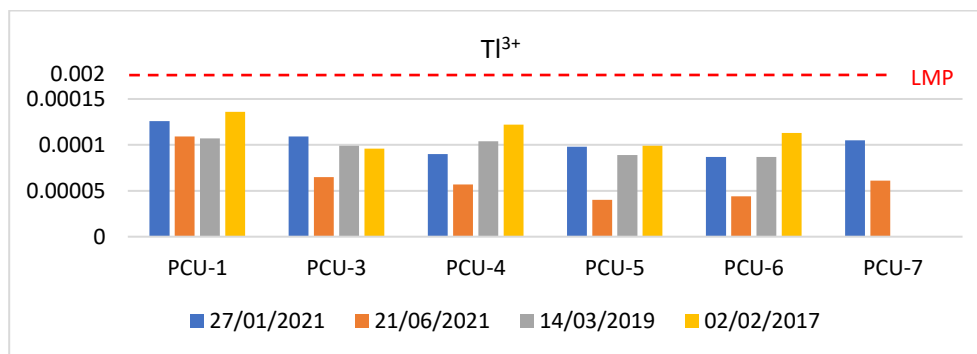


Figura 121. Concentraciones de Ti^{3+} en mg/L (elaboración propia, 2021).

42. Ti^{4+}

El Ti^{4+} se utiliza comúnmente como pigmento blanco en pinturas exteriores. Efectos de la sobreexposición al polvo de Ti^{4+} : La inhalación del polvo puede causar tirantez y dolor en el pecho, tos, y dificultad para respirar (ATSDR, 2021). El 21 de enero del 2021 se registró una concentración de Ti^{4+} de 0.0037 mg/L, cantidad más elevada registrada hasta la fecha (Véanse figuras 122 y 123).

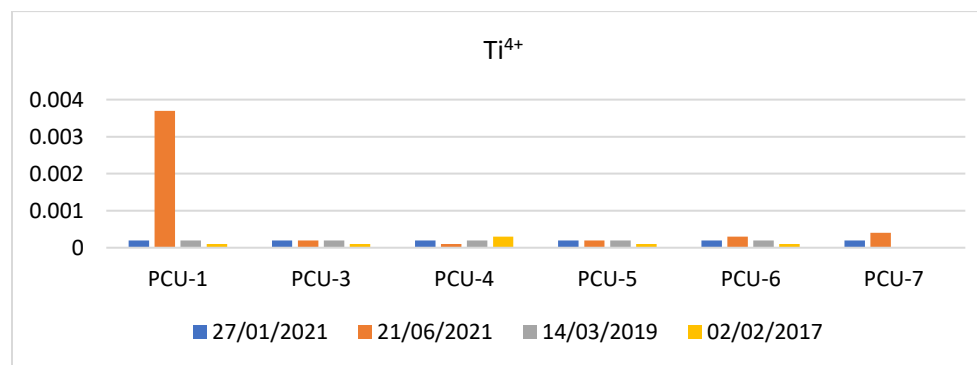
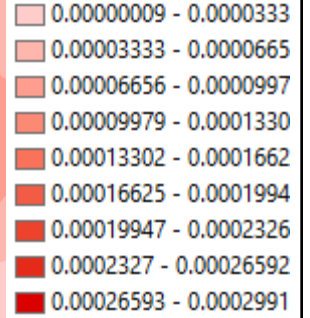
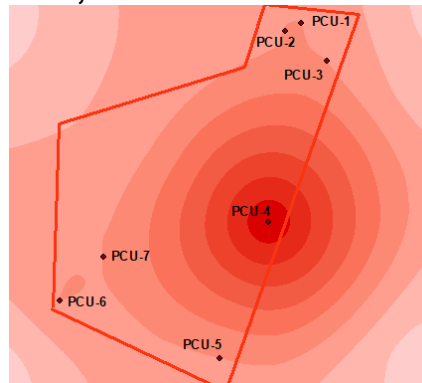
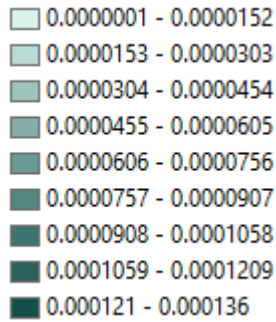
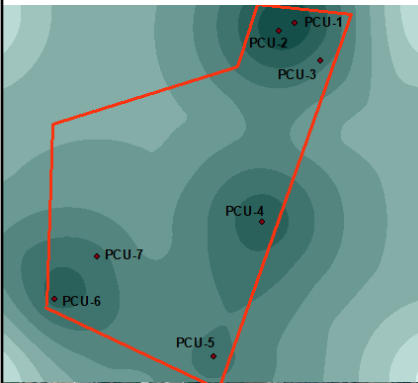
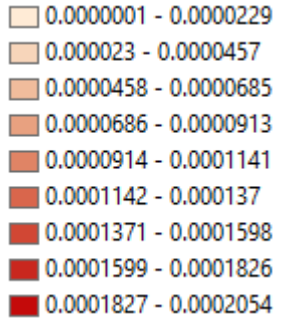
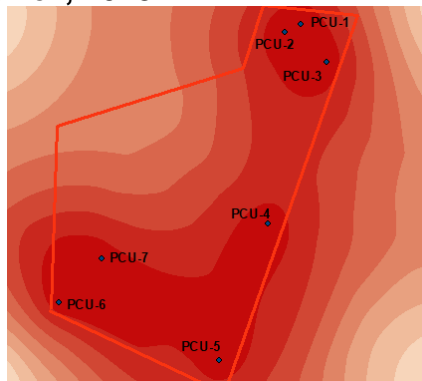
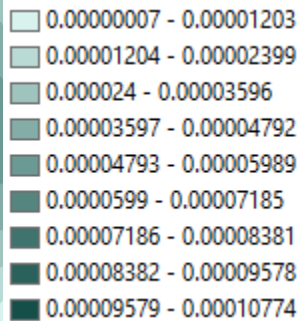
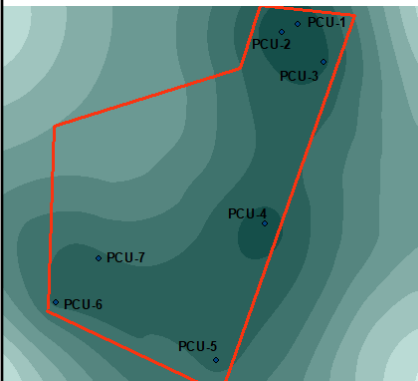


Figura 122. Concentraciones de Ti^{4+} en mg/L (elaboración propia, 2021).

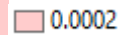
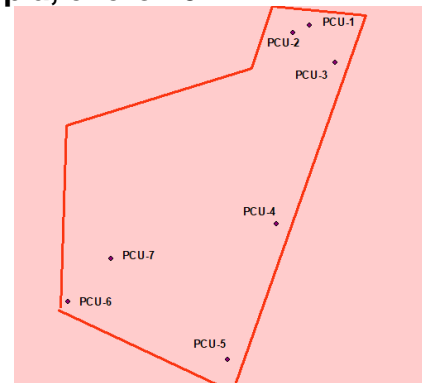
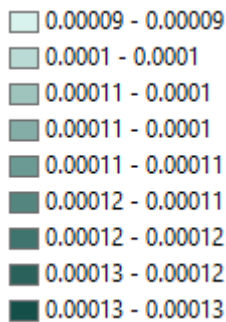
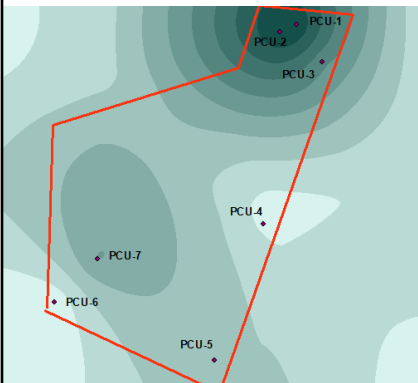
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

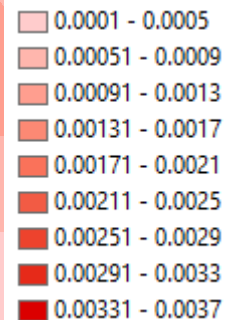
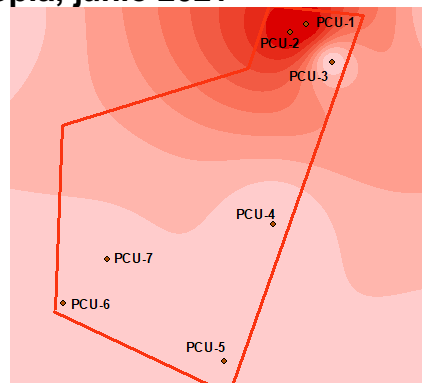
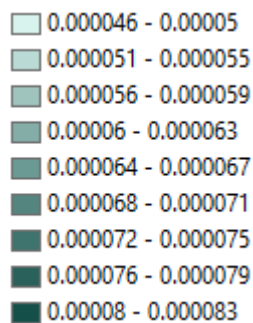
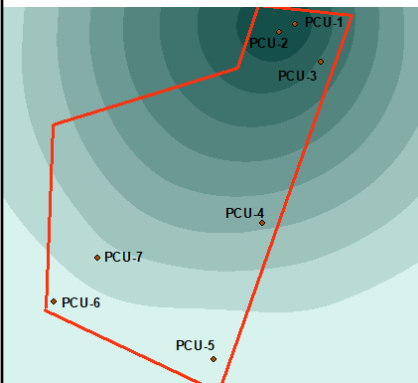


Figura 123. Mapas temáticos de distribución en representación del Ti^{3+} y del Ti^{4+} (elaboración propia, 2021).

43. Tb³⁺

El Tb³⁺ puede ser encontrado en televisiones, lámparas y cristales; es peligroso debido a que las humedades y los gases pueden ser inhalados con el aire. Esto puede causar embolias pulmonares, especialmente durante exposiciones a largo plazo. El Tb³⁺ puede ser una amenaza para el hígado cuando se acumula en el cuerpo humano (ATSDR, 2021). Las concentraciones más elevadas de Tb³⁺ encontradas corresponden al muestreo de junio 2017, predominando en los pozos PCU-4, PCU-5 y PCU-6 (Véanse figuras 124 y 126).

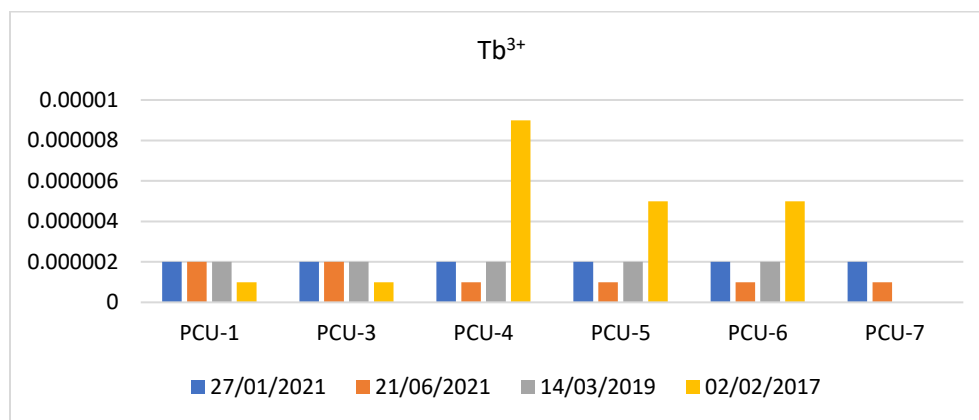


Figura 124. Concentraciones de Tb³⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

44. U⁶⁺

Las personas siempre estamos expuestas a cierta cantidad de U⁶⁺ en la comida, el aire, el suelo y el agua, ya que está presente en éstos de forma natural. El U⁶⁺ se presentó en los muestreos con cantidades desde 0.00309 hasta 0.00189 mg/L (Véanse figuras 125 y 126).

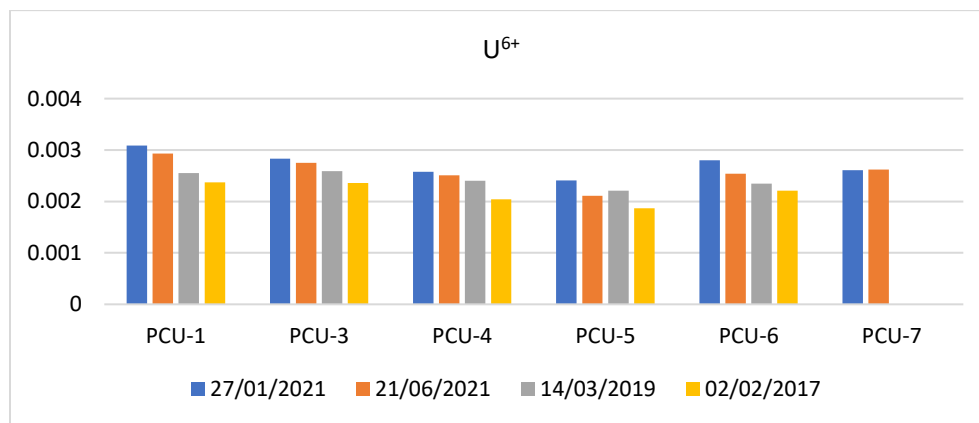
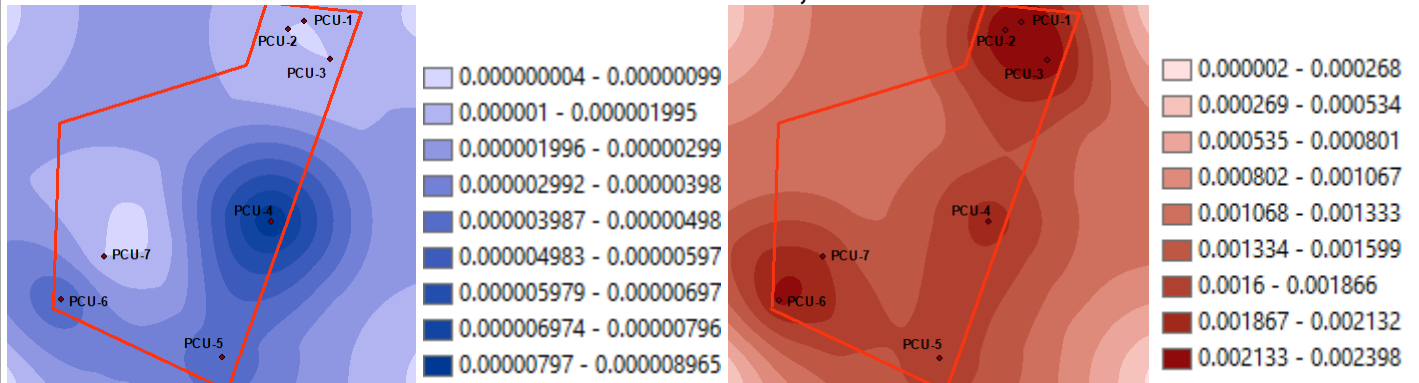
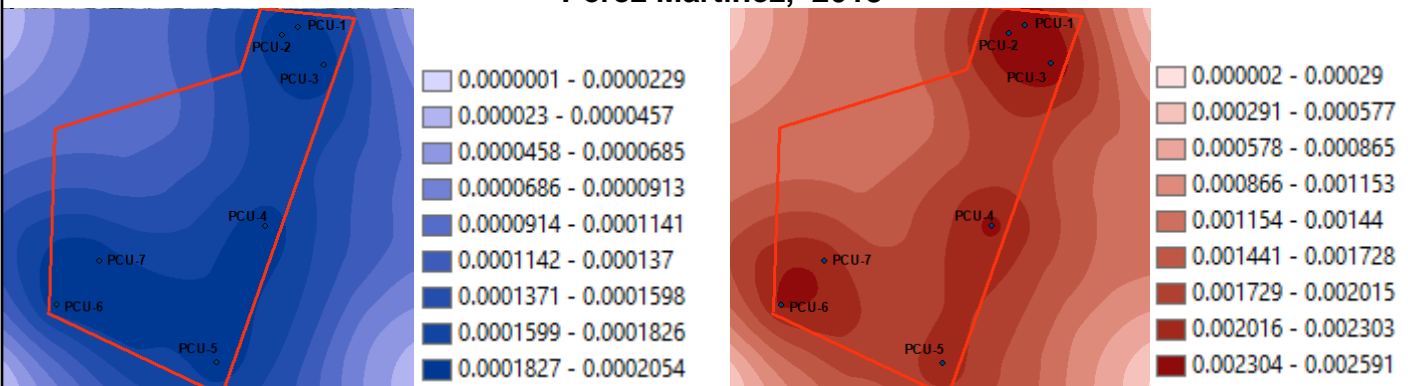


Figura 125. Concentraciones de U⁶⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

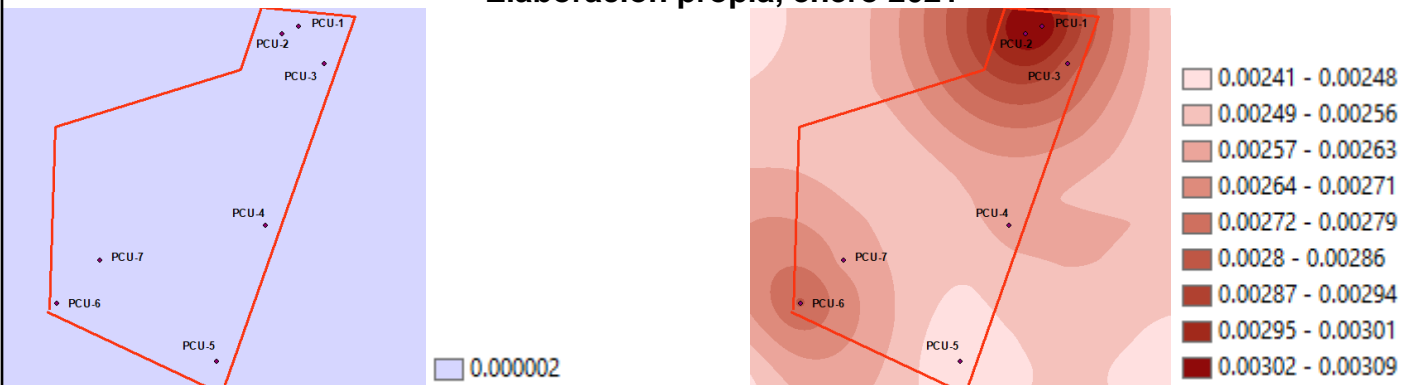
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

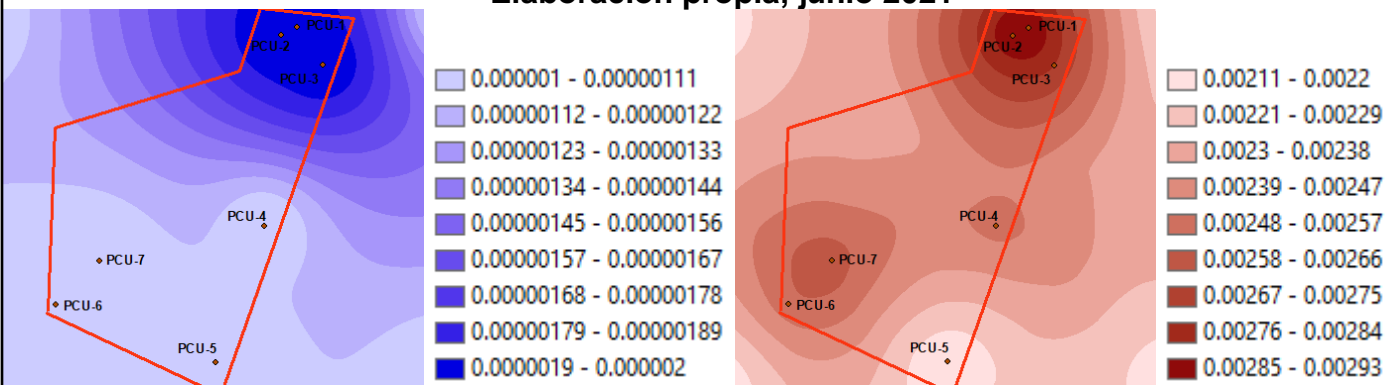


Figura 126. Mapas temáticos de distribución en representación del Tb³⁺ y del U⁶⁺ (elaboración propia, 2021).

45. V⁵⁺

El V⁵⁺ puede tener un número de efectos sobre la salud humana, cuando la toma es muy alta. Cuando el V⁵⁺ es acumulado a través del aire, puede causar bronquitis y neumonía. Los efectos graves del V⁵⁺ son irritación de pulmones, garganta, ojos y cavidades nasales (ATSDR, 2021). Las concentraciones más altas de V⁵⁺ se obtuvieron en el muestreo de junio 2017 (Véanse figuras 127 y 129).

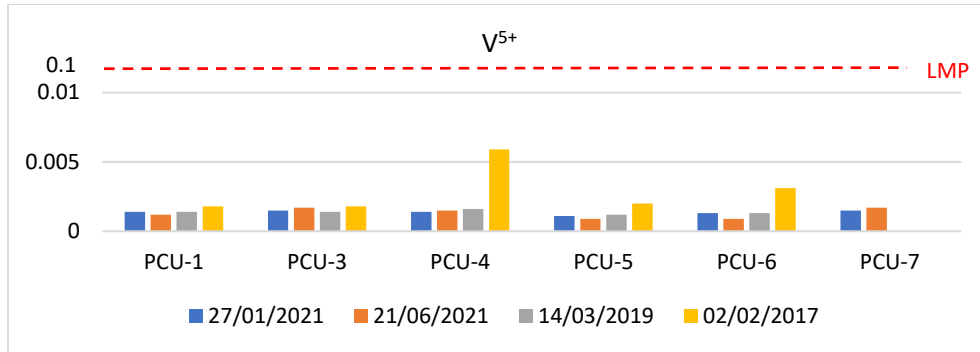


Figura 127. Concentraciones de V⁵⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

46. W⁶⁺

Es uno de los mejores materiales para herramientas duras. Efectos agudos sobre la salud: Irritación de piel y ojos al contacto. La inhalación causa irritación de pulmones y de la membrana mucosa (ATSDR, 2021). En marzo 2019 los valores del W⁶⁺ fueron de 0.0004 mg/L en todos los pozos, por su parte, junio 2021 se alcanzó una concentración de casi 0.0006 mg/L en el pozo PCU-1, cantidad más alta hasta la fecha (Véanse figuras 128 y 129).

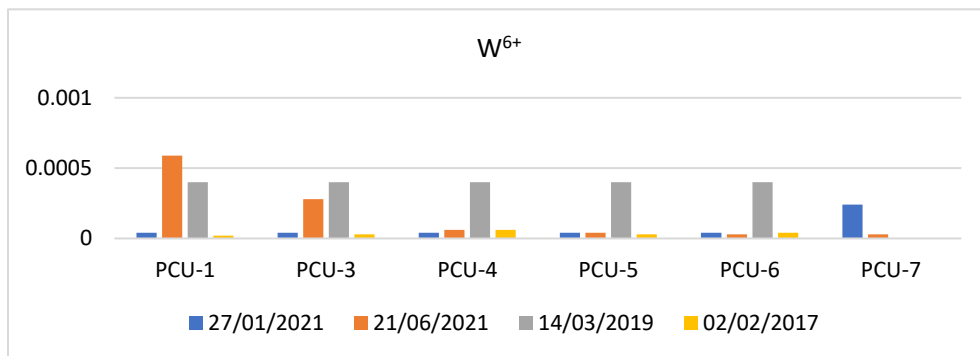
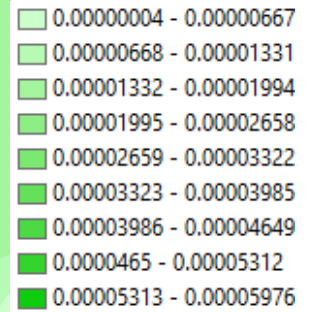
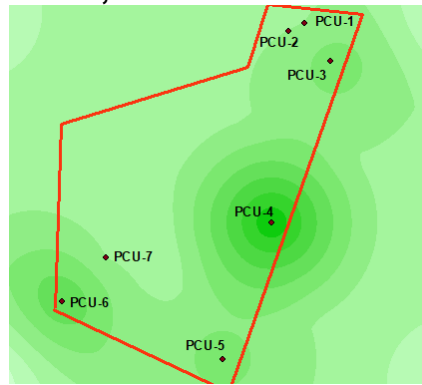
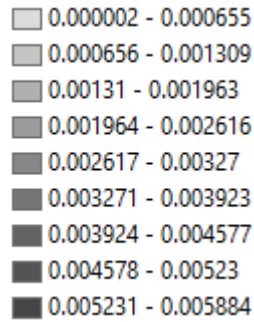
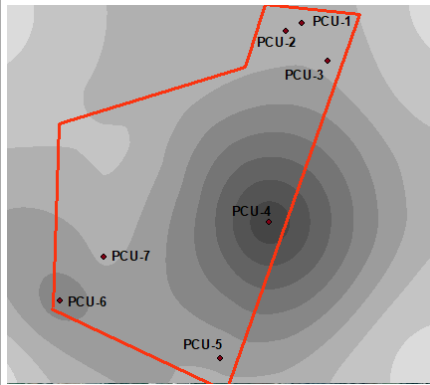
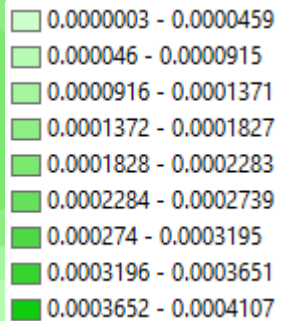
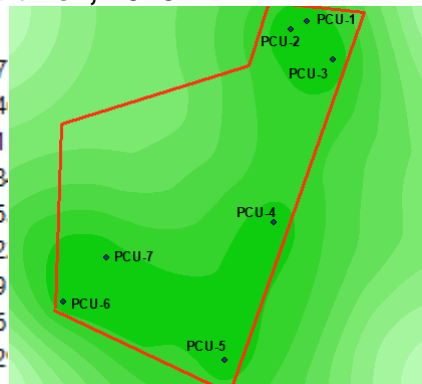
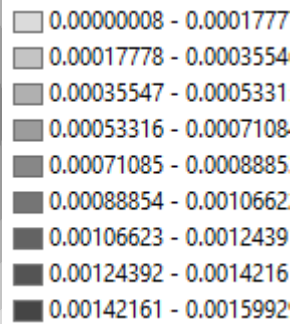
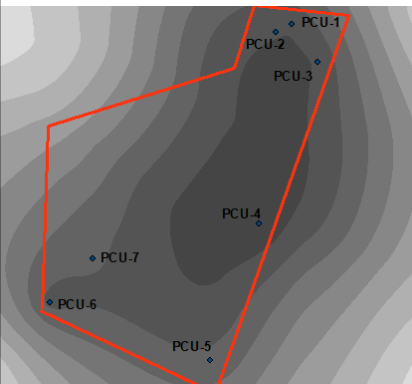


Figura 128. Concentraciones de W⁶⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

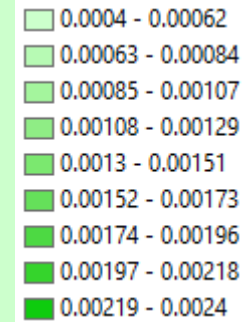
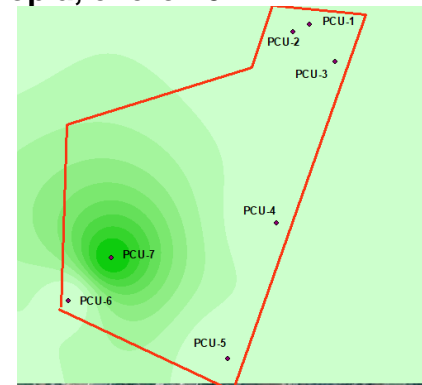
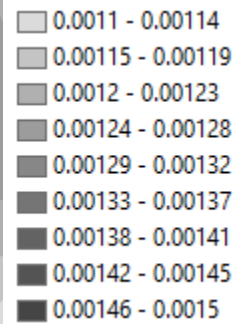
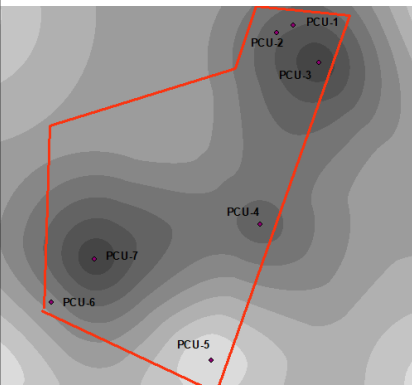
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

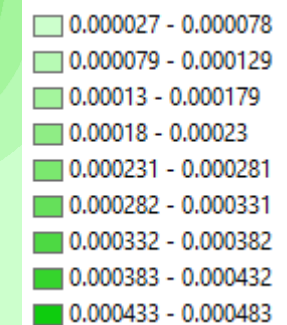
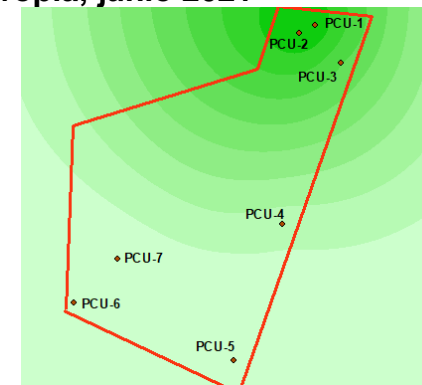
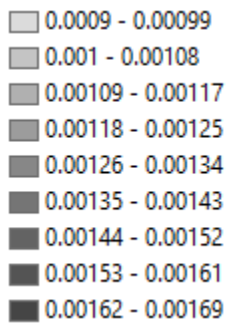
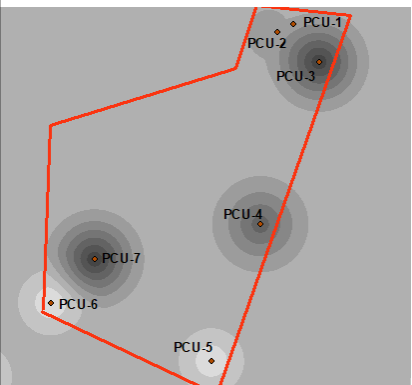


Figura 129. Mapas temáticos de distribución en representación del V⁵⁺ y del W⁶⁺ (elaboración propia, 2021).

47. Zn²⁺

Los usos del Zn²⁺ los constituyen las aleaciones y el recubrimiento protector de otros metales. En el Ambiente de trabajo el contacto con Zn²⁺ puede causar la gripe conocida como la fiebre del metal. El Zn²⁺, además, puede dañar a los niños que no han nacido y a los recién nacidos (ATSDR, 2021). Las concentraciones de Zn²⁺ más predominantes corresponden al muestreo de junio 2017 con valores de hasta 0.0686 mg/L (Véanse figuras 130 y 132).

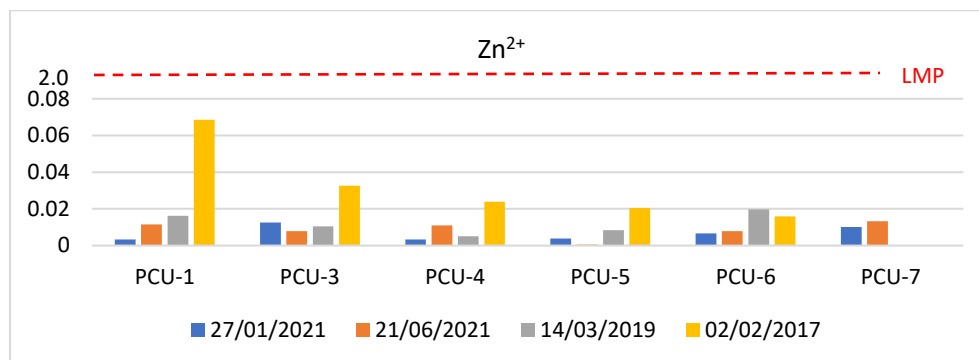


Figura 130. Concentraciones de Zn²⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

48. In³⁺

El In³⁺ no tiene ningún papel biológico. Se dice que en pequeñas dosis estimula el metabolismo. Los compuestos del In³⁺ se encuentran muy raramente. Todos los compuestos del In³⁺ deben ser considerados como altamente tóxicos. Los compuestos del In³⁺ provocan daños en el corazón, riñones e hígado y pueden ser teratógenos (ATSDR, 2021). El pozo PCU-1 y PCU-4 presentaron las concentraciones más elevadas de In³⁺ con valores de 0.000015 y 0.000005 mg/L respectivamente (Véanse figuras 131 y 132).

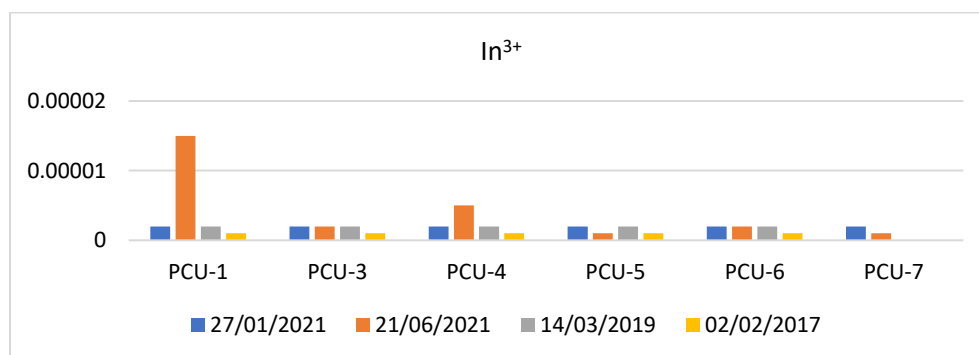
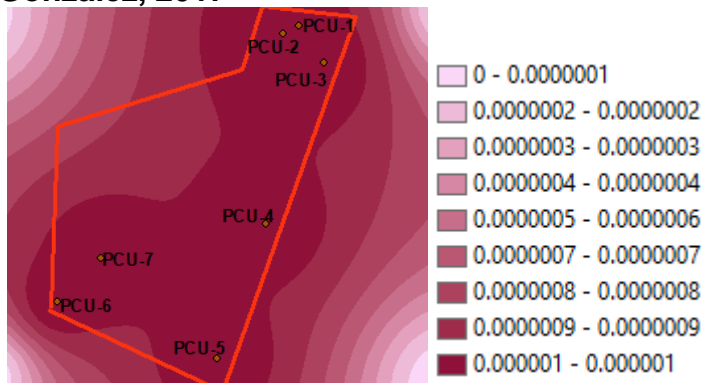
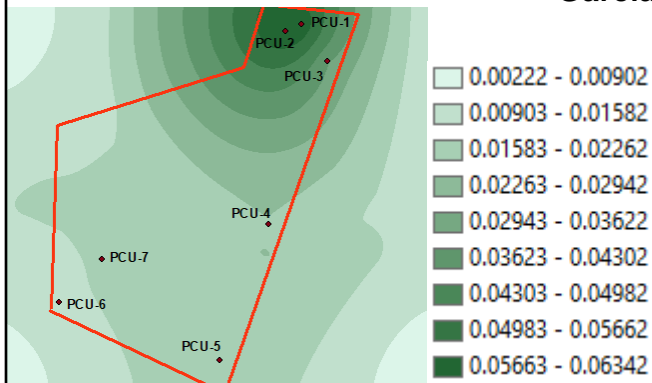
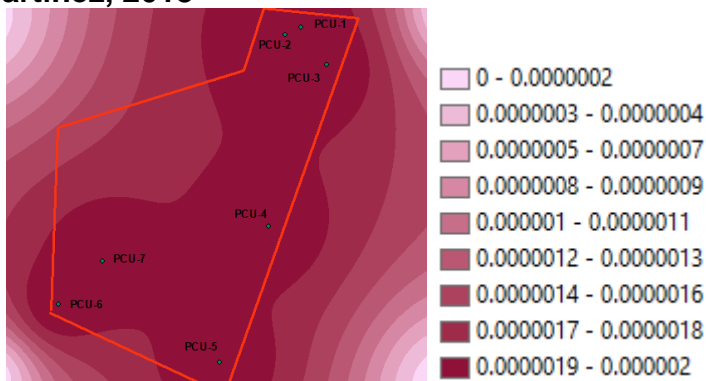
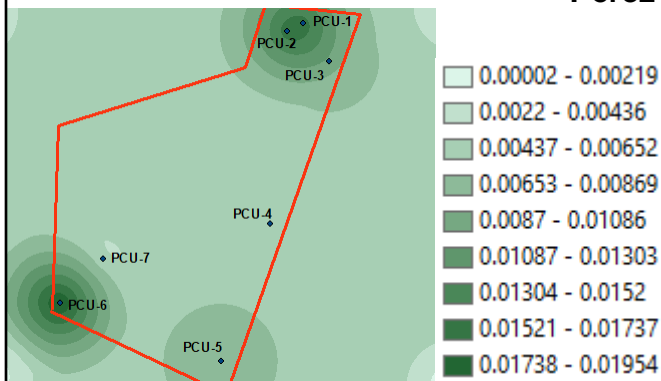


Figura 131. Concentraciones de In³⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

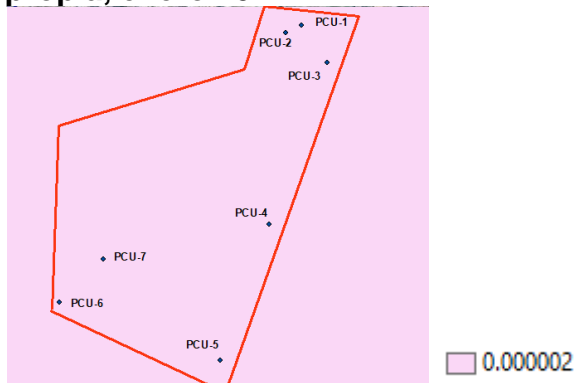
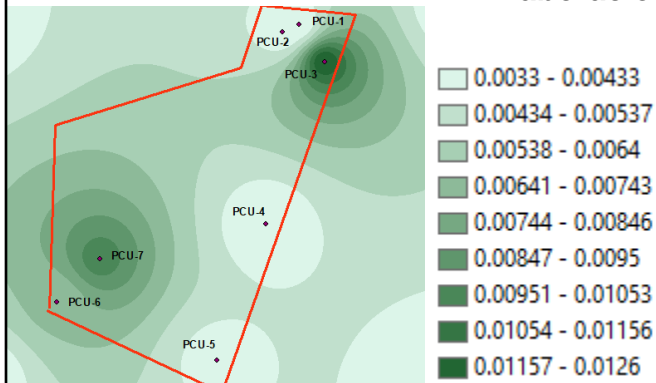
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

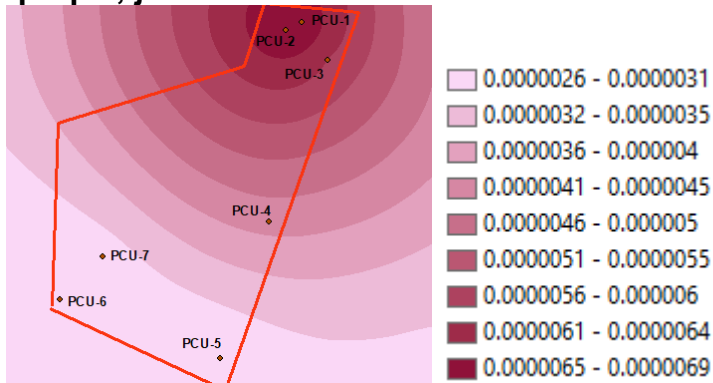
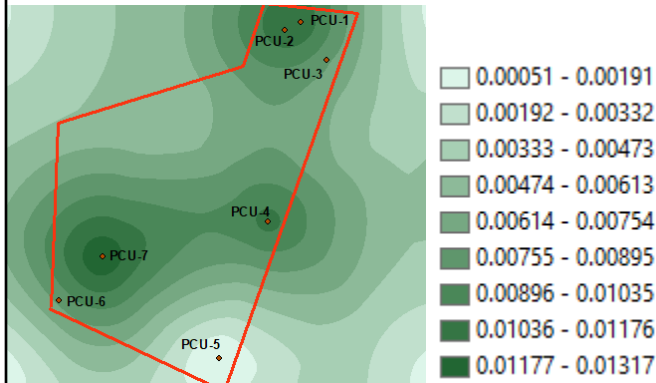


Figura 132. Mapas temáticos de distribución en representación del Zn²⁺ y del In³⁺ (elaboración propia, 2021).

49. Th⁴⁺

Grandes cantidades de Th⁴⁺ pueden ser encontradas cerca de vertederos peligrosos, las personas que viven cerca de estos lugares pueden estar expuestas. Respirar Th⁴⁺ incrementa las posibilidades de desarrollar enfermedades de pulmón, cáncer de pulmón y cáncer de páncreas muchos años después de la exposición (ATSDR, 2021). Los niveles más elevados de Th⁴⁺ se encontraron en el muestreo realizado en junio del 2017 con valores hasta de 0.000013 mg/L (Véanse figuras 133 y 135).

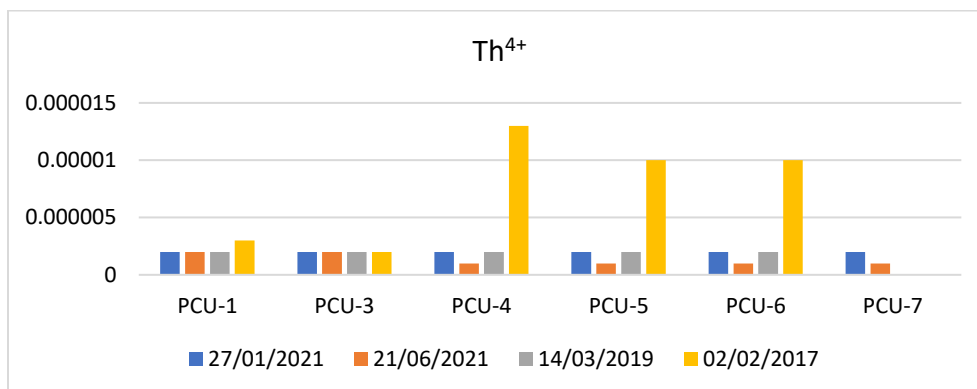


Figura 133. Concentraciones de Th⁴⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

50. Sm³⁺

El Sm³⁺ es encontrado en televisiones, lámparas y cristales. La exposición a largo plazo puede causar embolias pulmonares (ATSDR, 2021). Las concentraciones más elevadas se encontraron en el muestreo de junio 2017, con concentraciones de hasta 0.000064 mg/L (Véanse figuras 134 y 135).

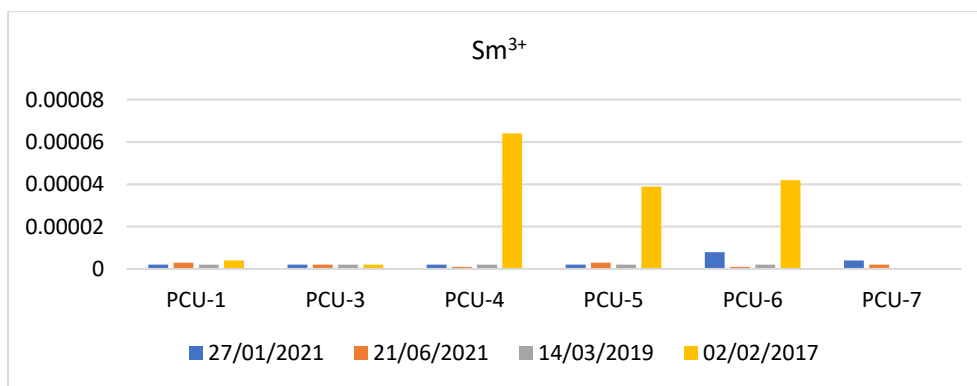
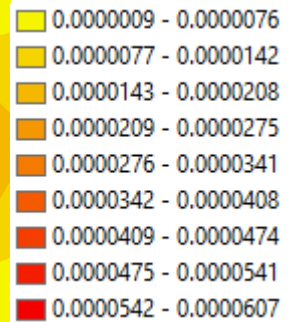
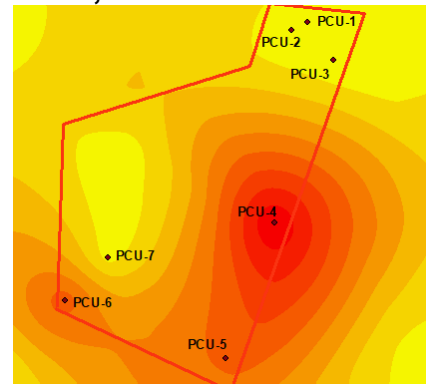
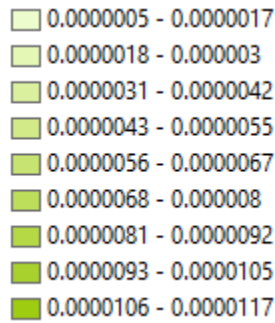
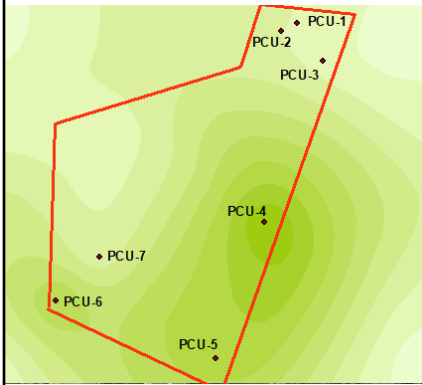
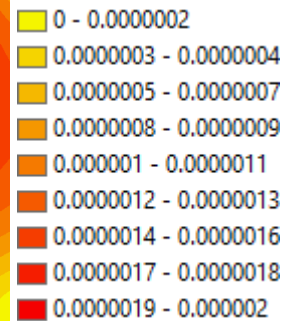
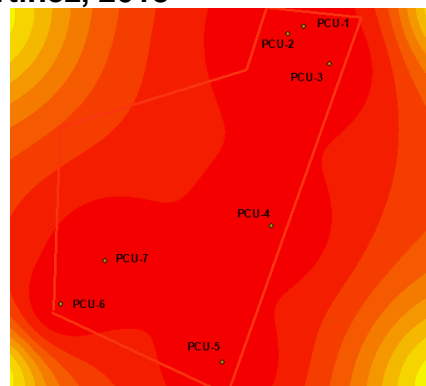
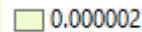
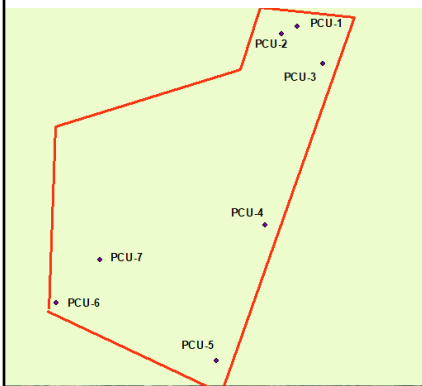


Figura 134. Concentraciones de Sm³⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

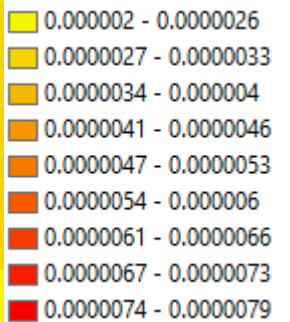
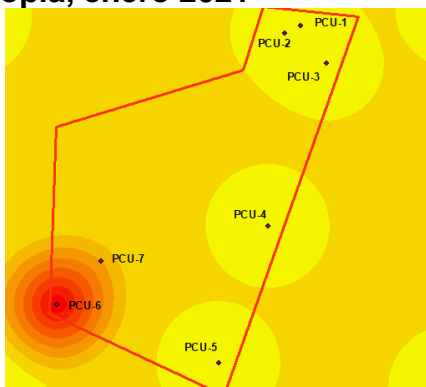
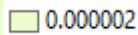
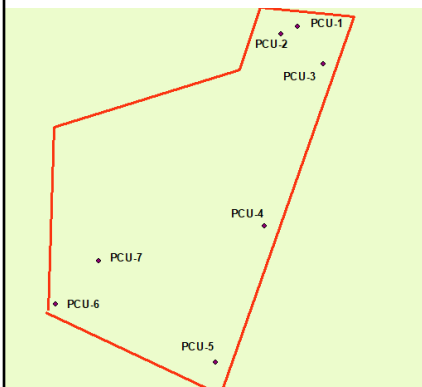
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

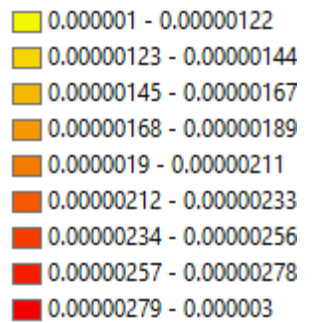
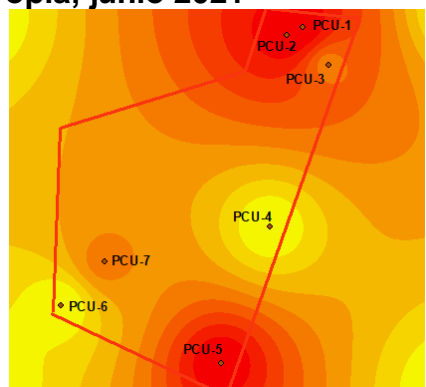
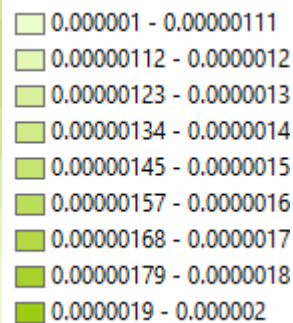
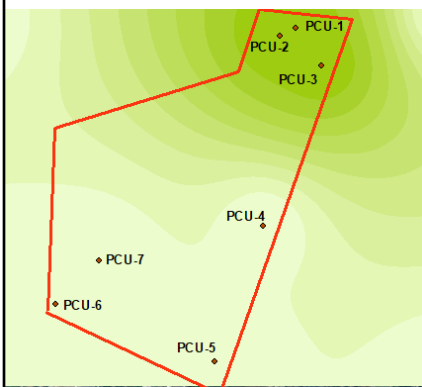


Figura 135. Mapas temáticos de distribución en representación del Th⁴⁺ y del Sm³⁺ (elaboración propia, 2021).

51. Pr³⁺

El Pr³⁺ es encontrado en televisiones, lámparas y cristales. La exposición a largo plazo puede causar embolias pulmonares (ATSDR, 2021). Las concentraciones más elevadas se encontraron en el muestreo de junio 2017, con concentraciones de hasta 0.000071 mg/L (Véanse figuras 136 y 138).

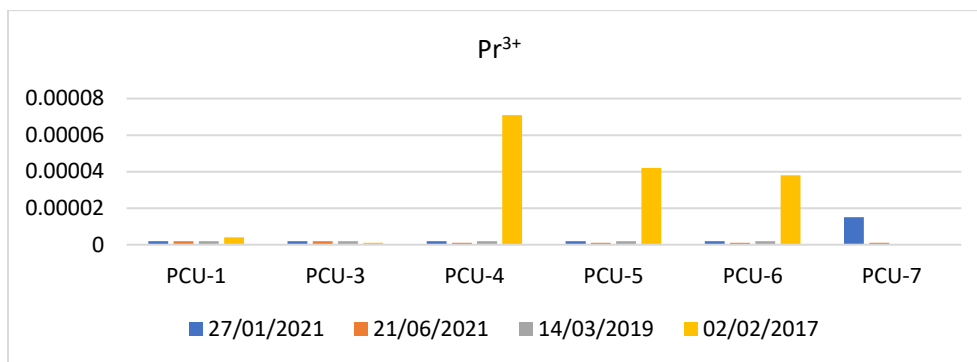


Figura 136. Concentraciones de Pr³⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

52. Pb⁴⁺

El Pb⁴⁺ es un metal blando que ha sido conocido a través de los años por muchas aplicaciones. Este ha sido usado ampliamente desde el 5000 antes de Cristo para aplicaciones en productos metálicos, cables y tuberías, pero también en pinturas y pesticidas. El Pb⁴⁺ es uno de los cuatro metales que tienen un mayor efecto dañino sobre la salud humana (ATSDR, 2021). Los niveles más altos de Pb⁴⁺ fueron los reportados en el muestreo de junio 2021 con valores de hasta 0.00088 mg/L (Véanse figuras 137 y 138).

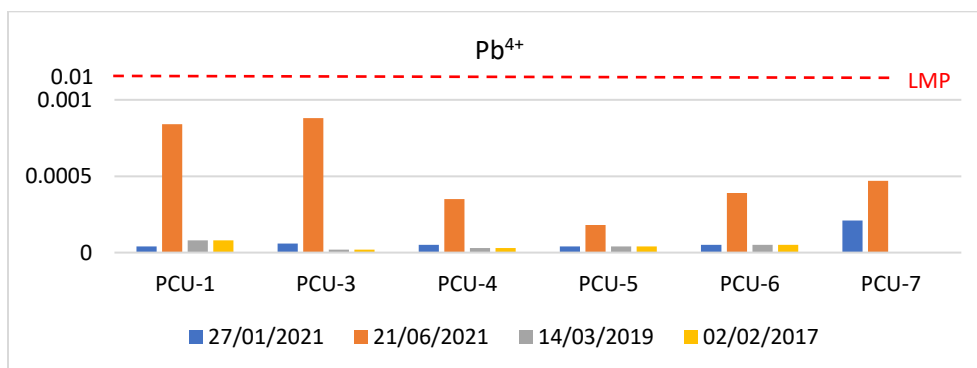
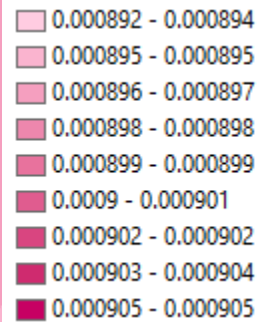
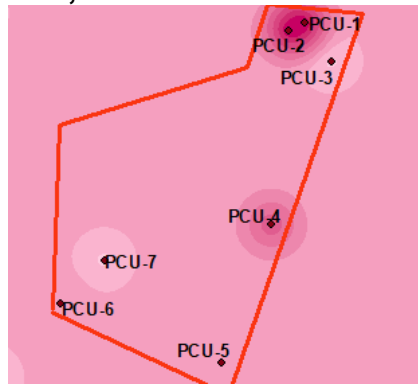
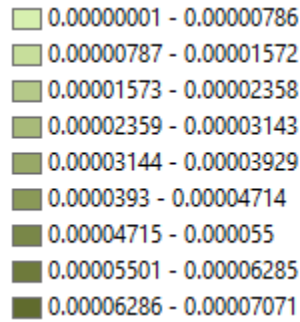
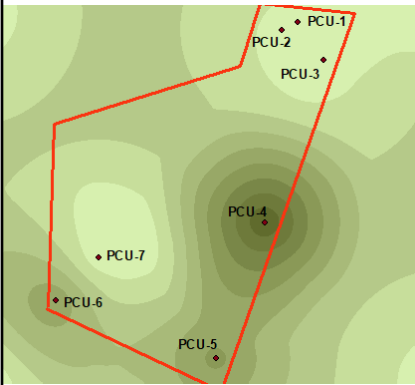
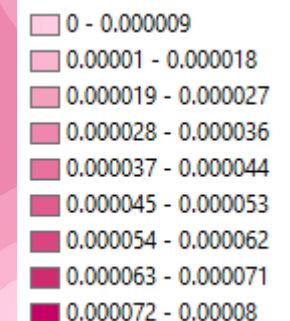
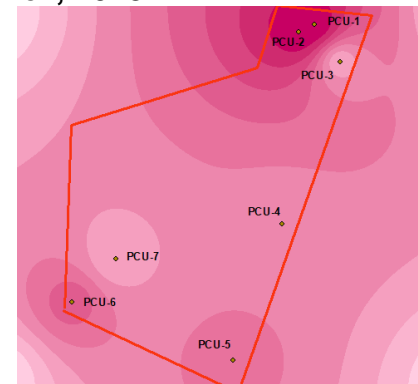
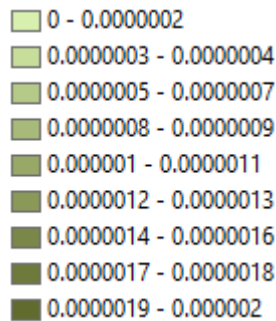
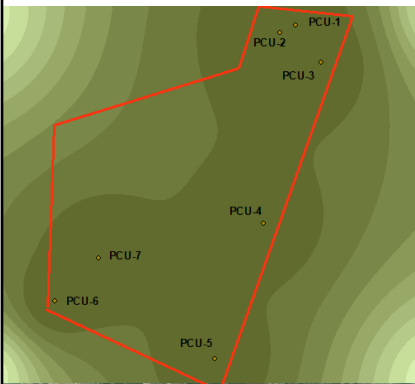


Figura 137. Concentraciones de Pb⁴⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

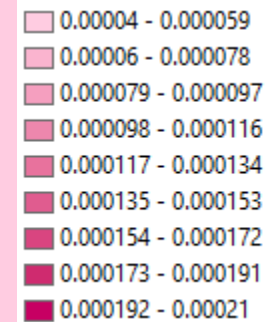
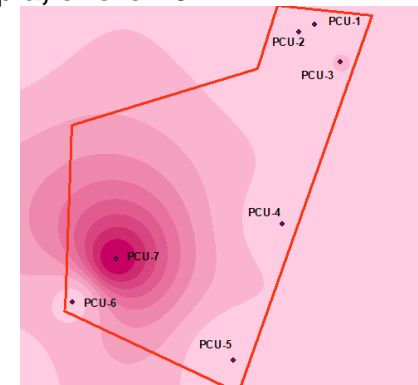
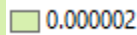
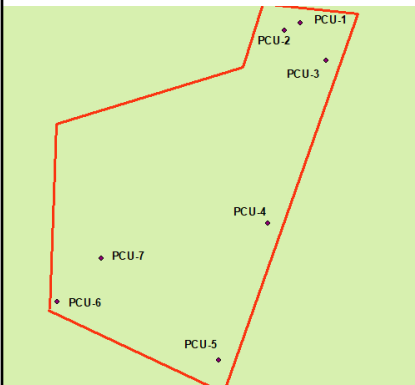
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

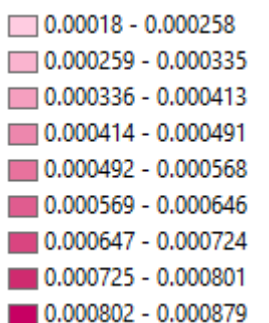
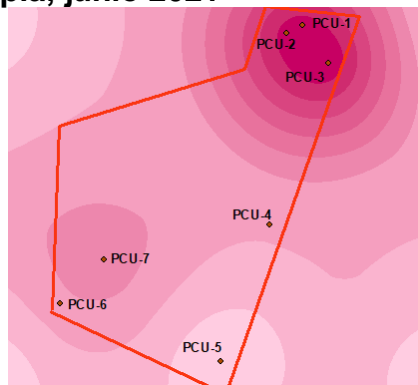
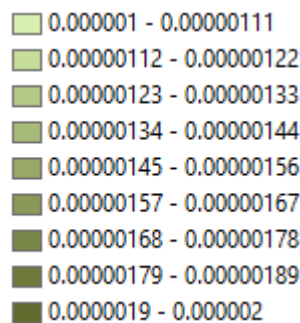
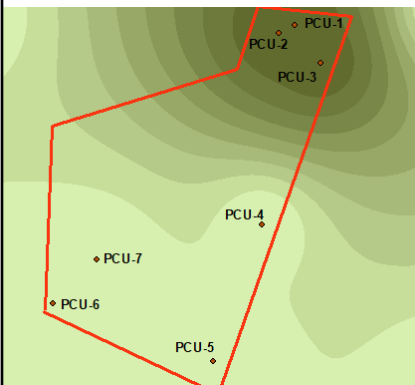


Figura 138. Mapas temáticos de distribución en representación del Pr³⁺ y del Pb⁴⁺ (elaboración propia, 2021).

53. Yb³⁺

El Yb³⁺ es encontrado en televisiones, lámparas y cristales. La exposición a largo plazo puede causar embolias pulmonares (ATSDR, 2021). Las concentraciones más elevadas se encontraron en el muestreo de junio 2017, con concentraciones de hasta 0.000307 mg/L (Véanse figuras 139 y 141).

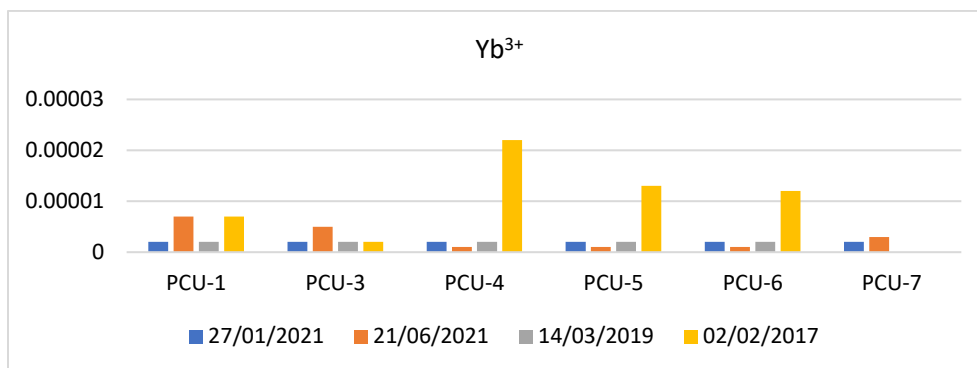


Figura 139. Concentraciones de Yb³⁺ en mg/L. (elaboración propia, 2021).

54. Ho³⁺

El Ho³⁺ es encontrado en televisiones, lámparas y cristales. La exposición a largo plazo puede causar embolias pulmonares (ATSDR, 2021). Las concentraciones más elevadas se encontraron en el muestreo de junio 2017, con concentraciones de hasta 0.00001 mg/L (Véanse figuras 140 y 141).

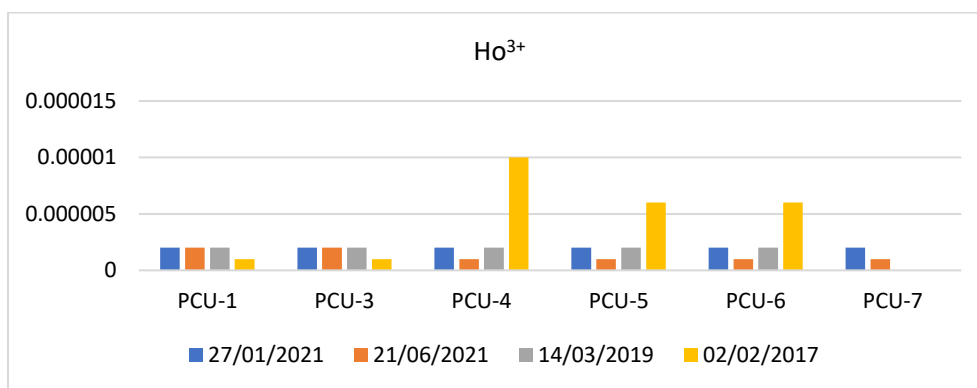
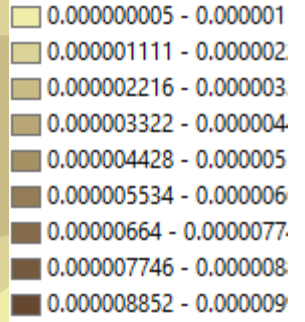
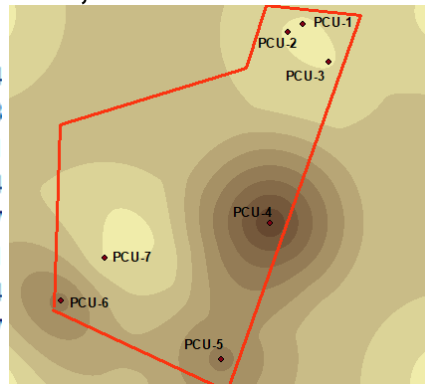
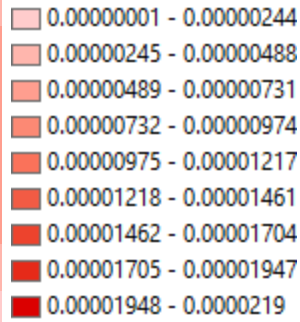
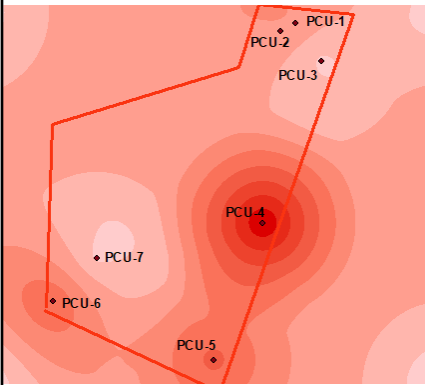
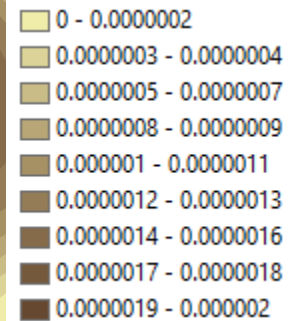
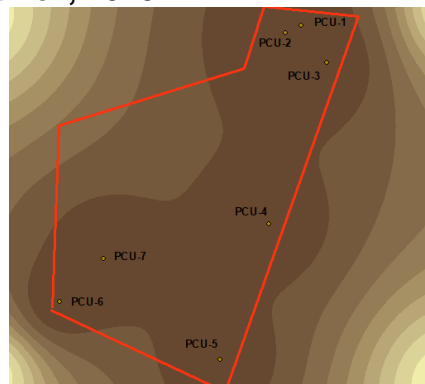
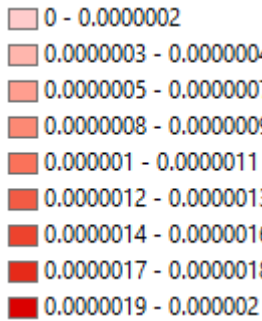
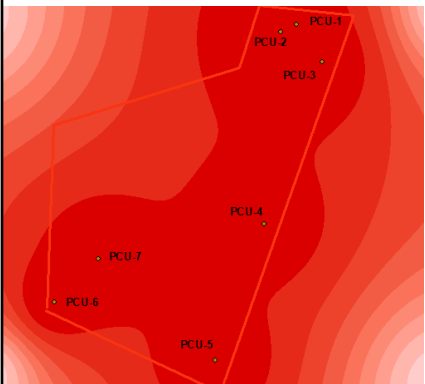


Figura 140. Concentraciones de Ho³⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

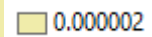
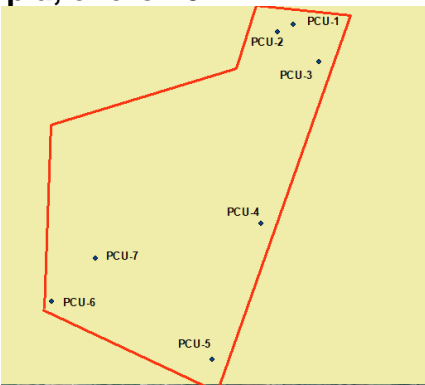
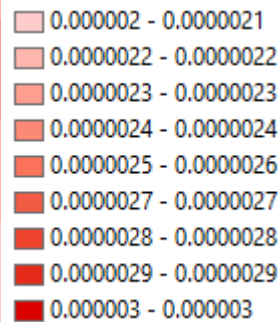
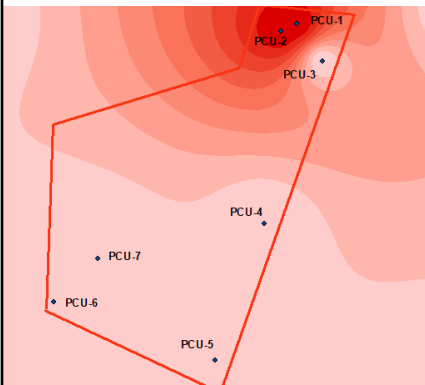
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

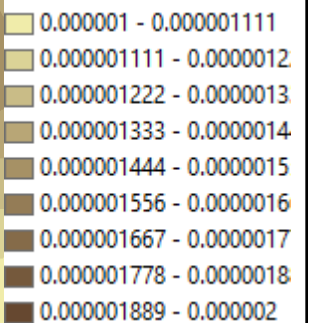
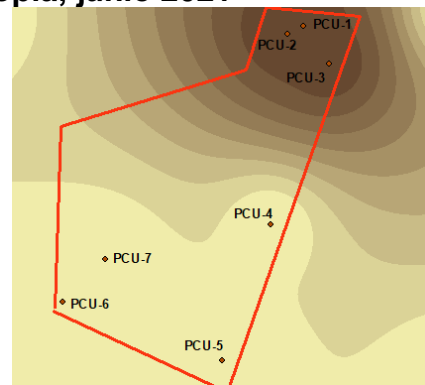
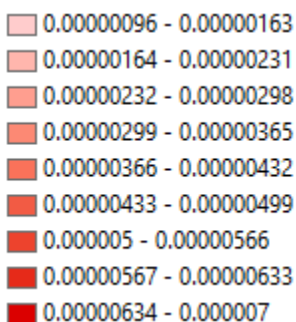
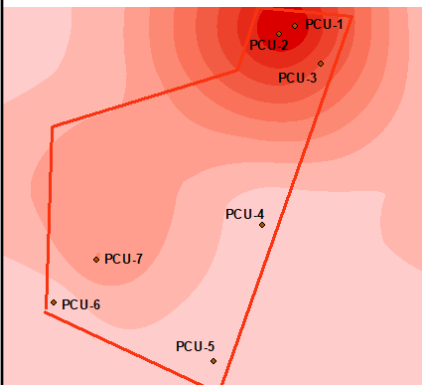


Figura 141. Mapas temáticos de distribución en representación del Yb³⁺ y del Ho³⁺ (elaboración propia, 2021).

55. Hf⁴⁺

El Hf⁴⁺ no tiene aplicaciones excepto en barras de control para reactores nucleares. Todos los compuestos del Hf⁴⁺ deben ser considerados como tóxicos, aunque evidencias iniciales parecen sugerir que el peligro es limitado (ATSDR, 2021). En junio 2017 y junio 2021, se alcanzaron las concentraciones más altas de Hf⁴⁺ con el valor de 0.000004 mg/L (Véanse figuras 142 y 144).

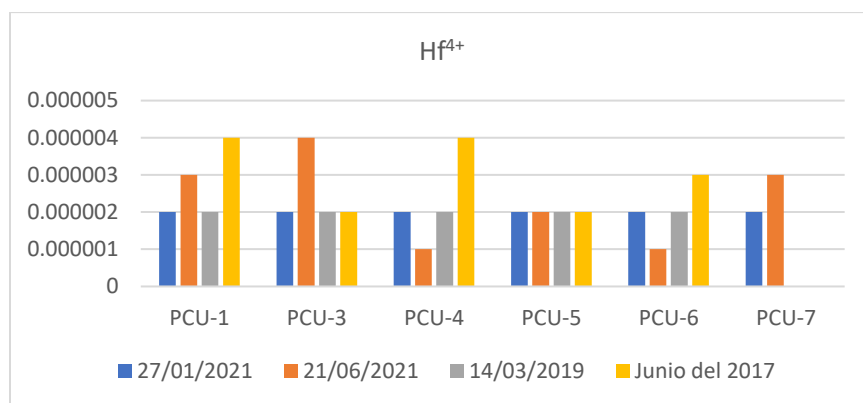


Figura 142. Concentraciones de Hf⁴⁺ mg/L (elaboración propia, 2021).

56. Er³⁺

El Er³⁺ es vertido al medio ambiente por industrias de petróleo y por desechos de equipos domésticos, lo cual provoca la acumulación en los suelos y en el agua de los suelos. El Er³⁺ tiene varias influencias negativas en la reproducción y en las funciones del sistema nervioso (ATSDR, 2021). Las concentraciones más elevadas corresponden a el muestreo de junio 2017 (Véanse figuras 143 y 144).

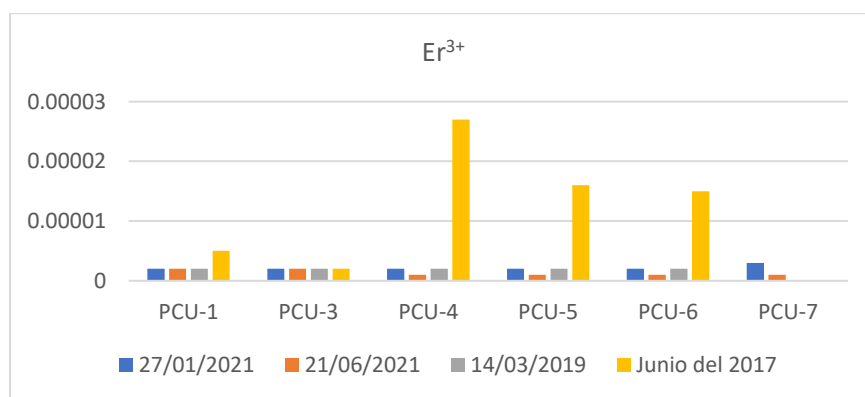
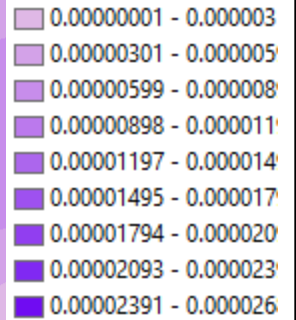
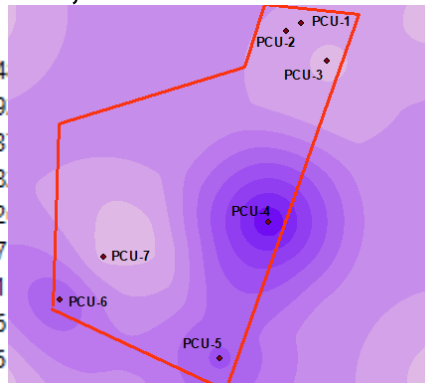
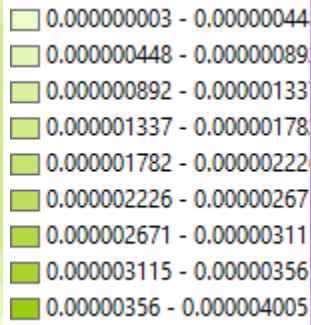
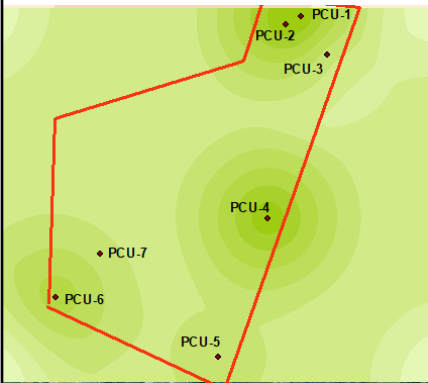
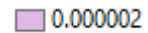
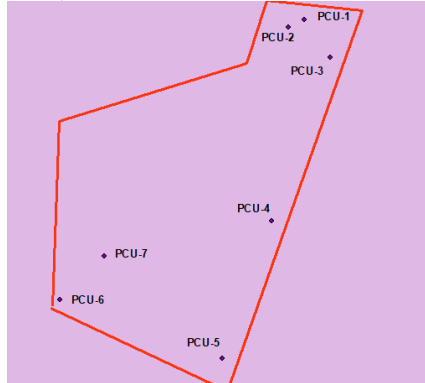
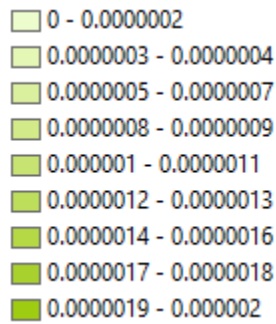
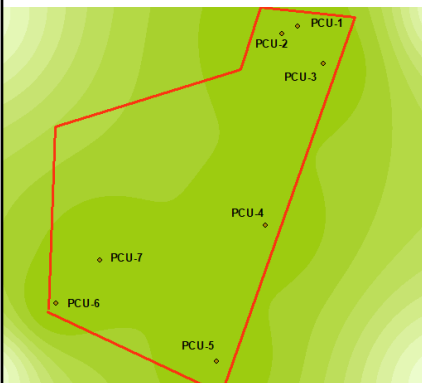


Figura 143. Concentraciones de Er³⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

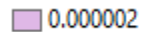
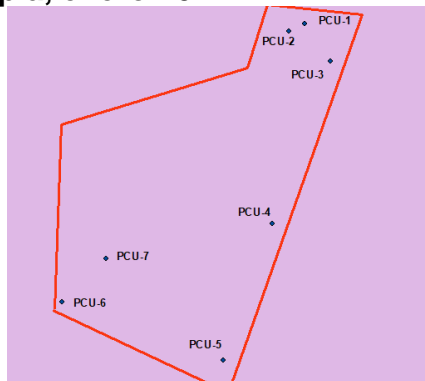
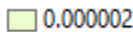
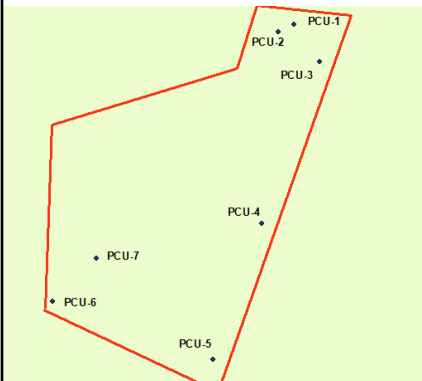
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

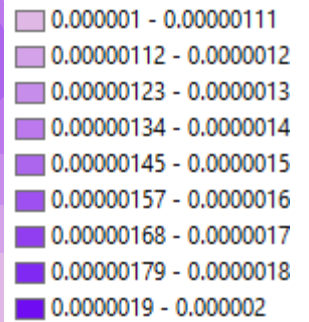
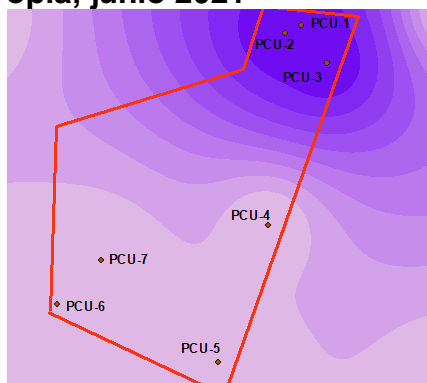
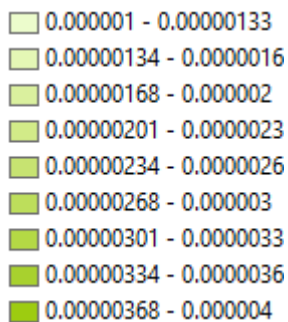
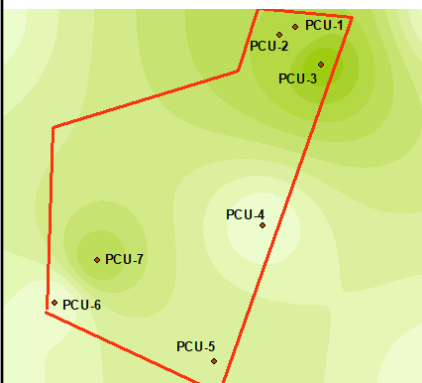


Figura 144. Mapas temáticos de distribución en representación del Hf⁴⁺ y del Er³⁺ (elaboración propia, 2021).

57. Dy³⁺

El Dy³⁺ es encontrado en televisiones, lámparas y cristales. La exposición a largo plazo puede causar embolias pulmonares (ATSDR, 2021). Las concentraciones más elevadas se encontraron en el muestreo de junio 2017, con concentraciones de hasta 0.000053 mg/L (Véanse figuras 145 y 147).

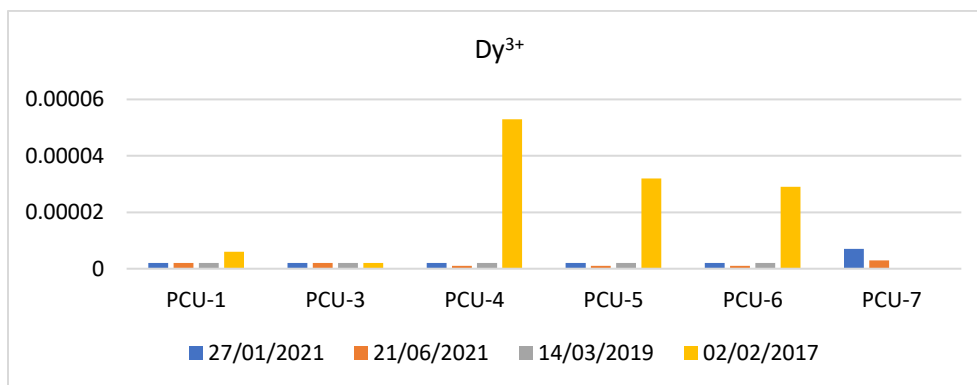


Figura 145. Concentraciones de Dy³⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

58. Tm³⁺

El Tm³⁺ es encontrado en televisiones, lámparas y cristales. La exposición a largo plazo puede causar embolias pulmonares (ATSDR, 2021). La concentración más elevada (0.000004 mg/L) se encontró en el muestreo de junio 2017 (Véanse figuras 146 y 147).

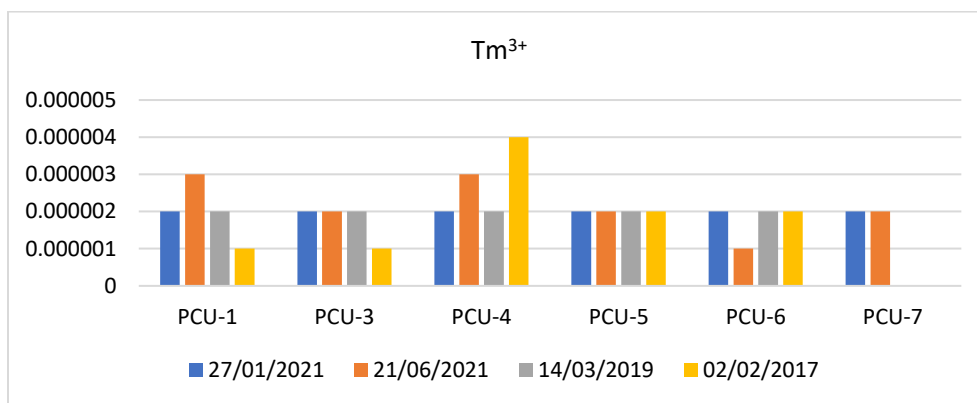
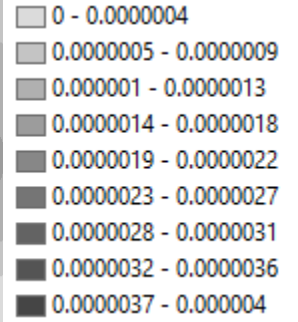
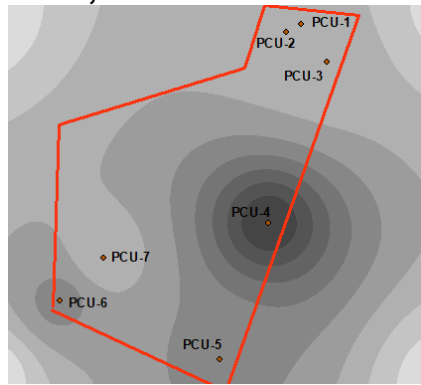
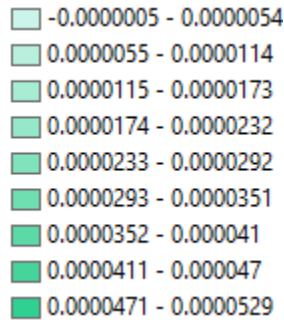
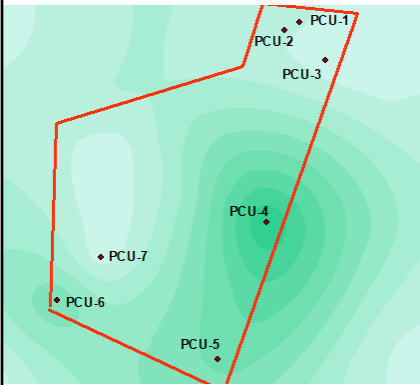
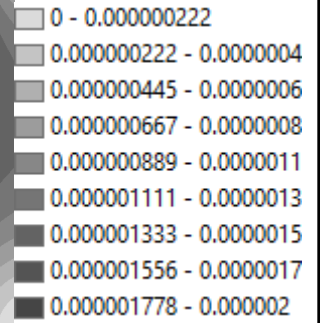
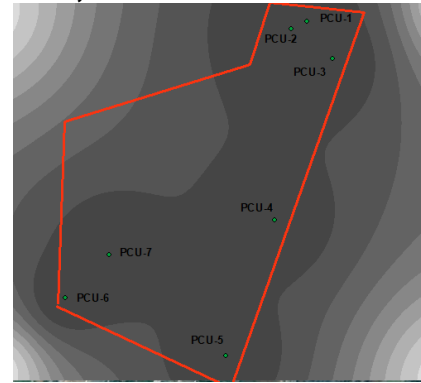
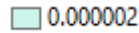
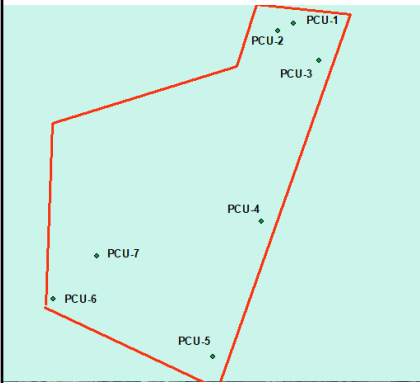


Figura 146. Concentraciones de Tm³⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

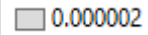
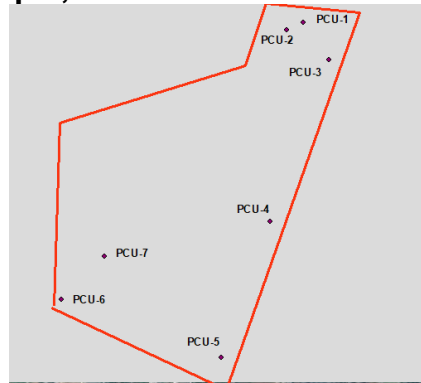
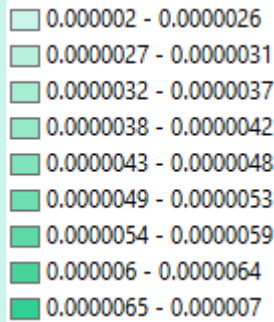
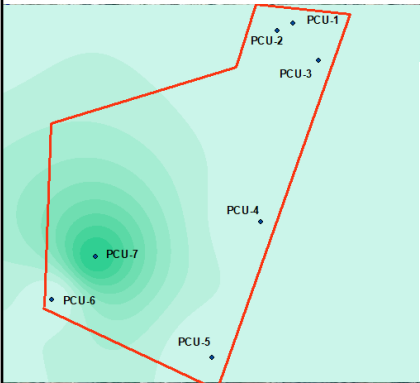
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

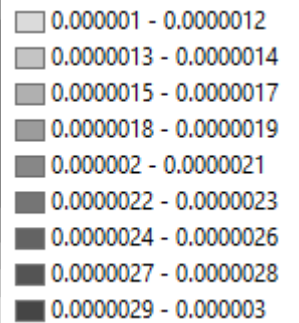
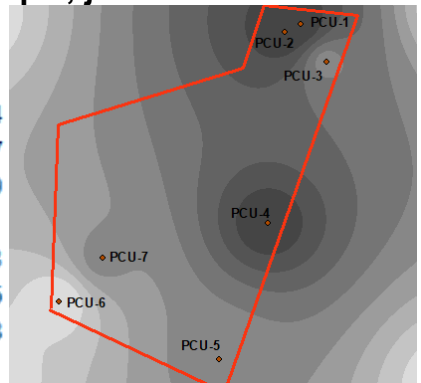
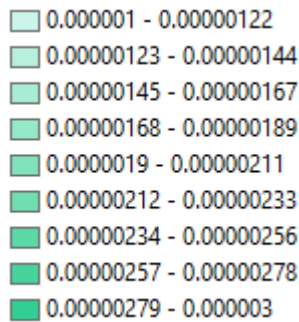
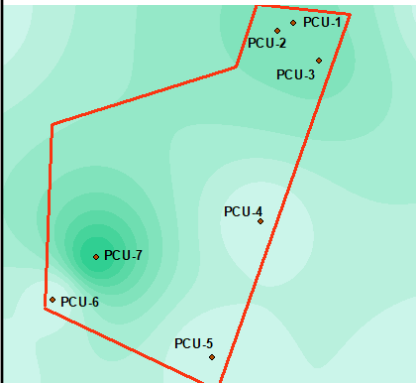


Figura 147. Mapas temáticos de distribución en representación del Dy³⁺ y del Tm³⁺ (elaboración propia, 2021).

59. Ta⁵⁺

El metal Ta⁵⁺ se emplea en la fabricación de capacitores para equipo electrónico, los cuales incluyen radios de banda civil, detectores de humo, marcapasos cardíacos y automóviles. Puede ser dañino por inhalación, ingestión o absorción cutánea. Provoca irritación de los ojos y la piel. El material es irritante de las membranas mucosas y el tracto respiratorio superior (ATSDR, 2021). En los últimos tres muestreos se alcanzaron concentraciones de 0.000002 mg/L de Ta⁵⁺, a diferencia del muestreo de García 2017 donde se obtuvieron concentraciones máximas de 0.000001 mg/L (Véanse figuras 148 y 149).

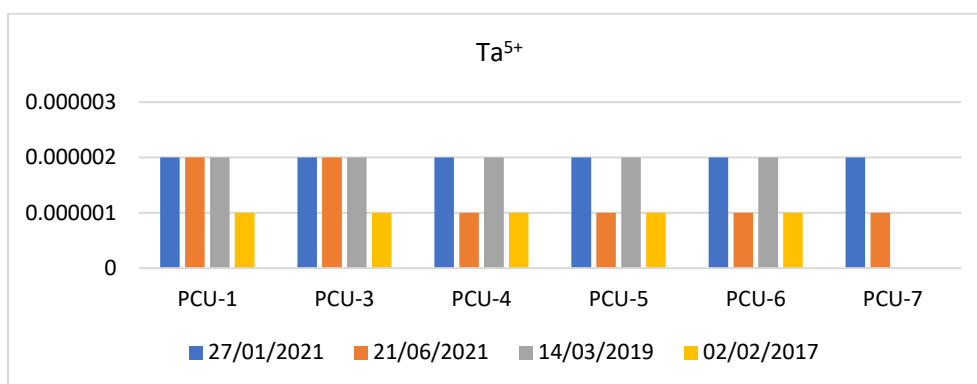
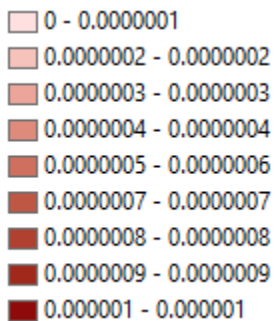
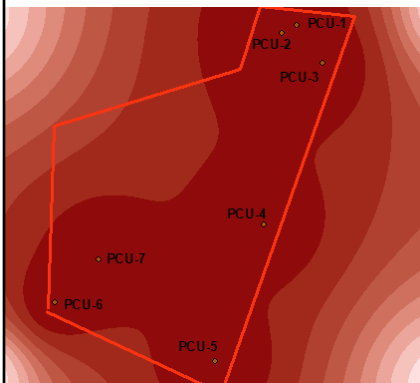
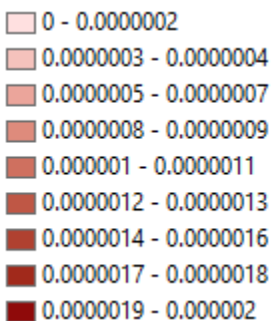
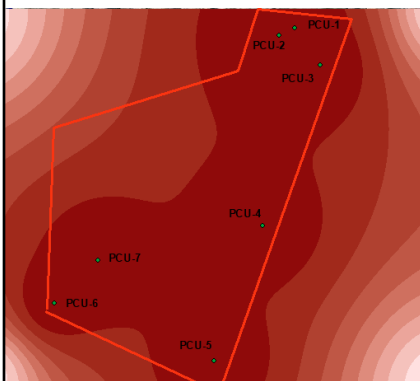


Figura 148. Concentraciones de Ta⁵⁺ en mg/L (elaboración propia, 2021).

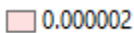
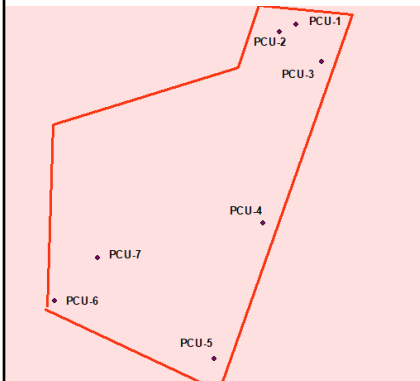
García González, 2017



Pérez Martínez, 2018



Elaboración propia, enero 2021



Elaboración propia, junio 2021

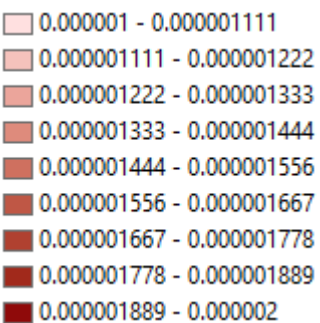
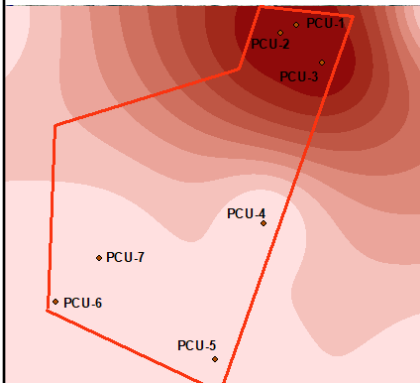


Figura 149. Mapa temático de distribución en representación del Ta⁵⁺ (elaboración propia, 2021).

Gráficas de representación de las concentraciones de metales en el agua subterránea

A continuación, se muestran las gráficas representativas de las concentraciones de metales en el agua subterránea donde se logra apreciar que dichos contaminantes predominan en los pozos PCU-1 y PCU-3 principalmente, sin embargo, el PCU-7 presenta elevadas concentraciones de algunos iones metálicos como el Fe^{3+} , Al^{3+} y Mn^{2+} (Véanse figuras 150, 151 y 152).

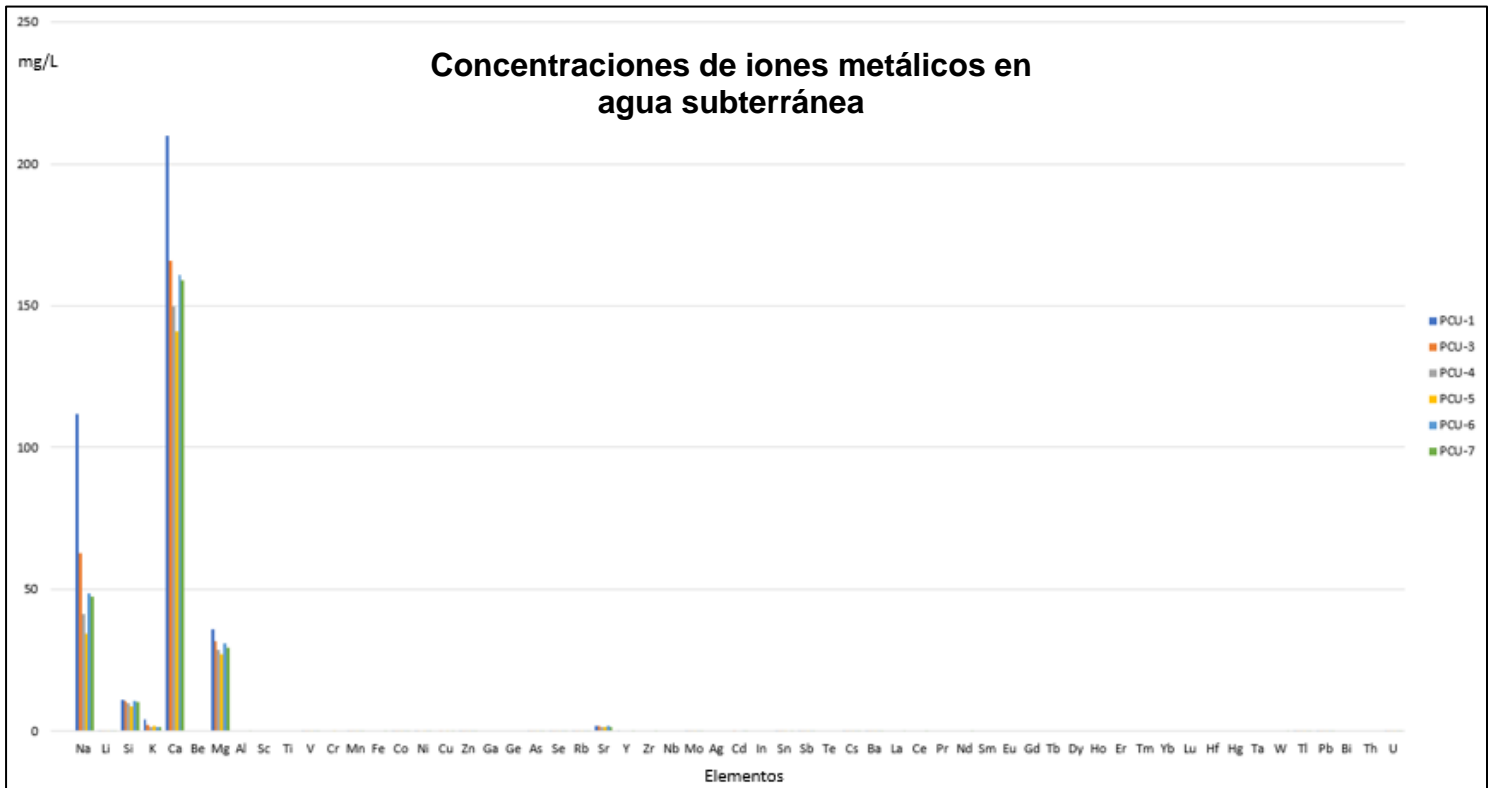


Figura 150. Concentraciones de metales en agua subterránea (elaboración propia, 2021).

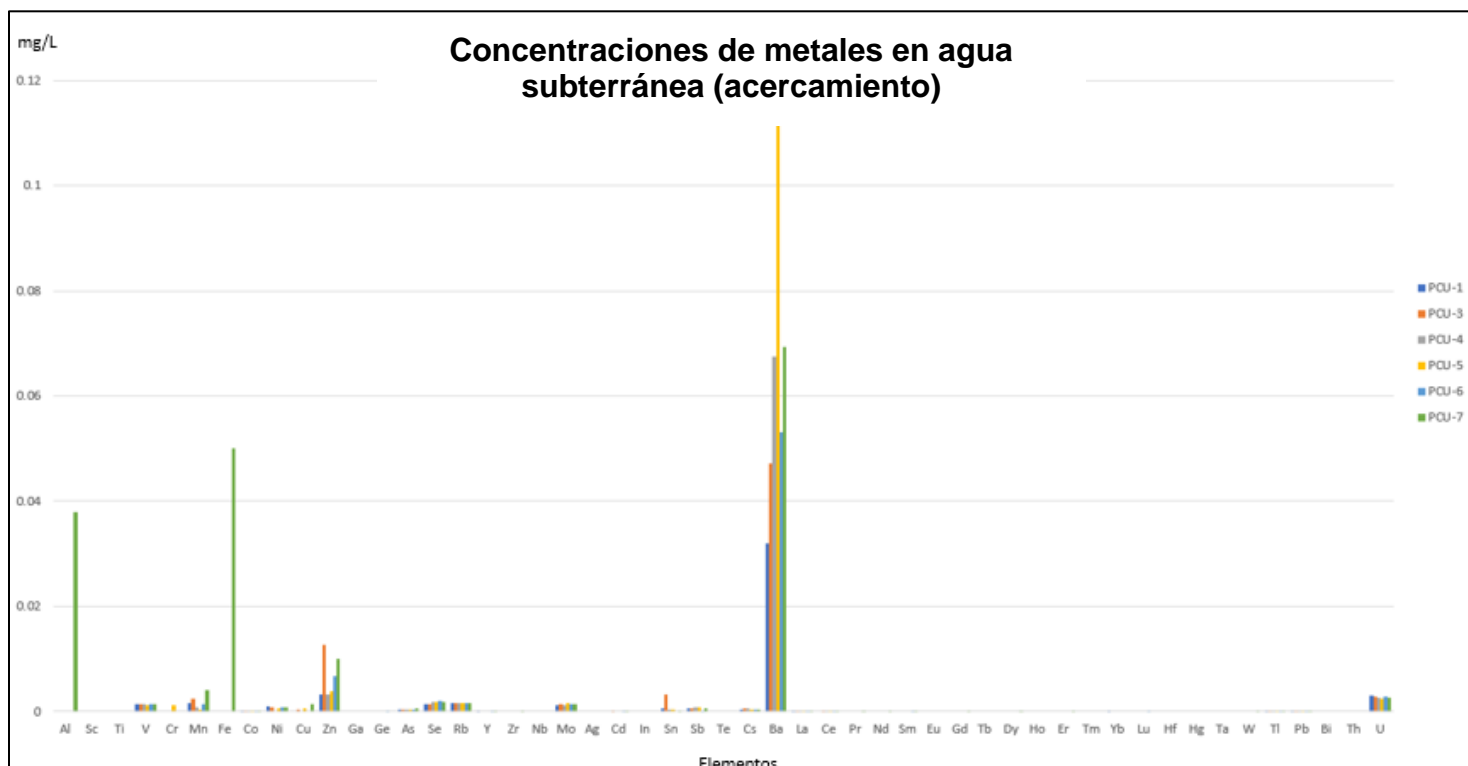


Figura 151. Concentraciones de metales en agua subterránea Zoom 1 (elaboración propia, 2021).

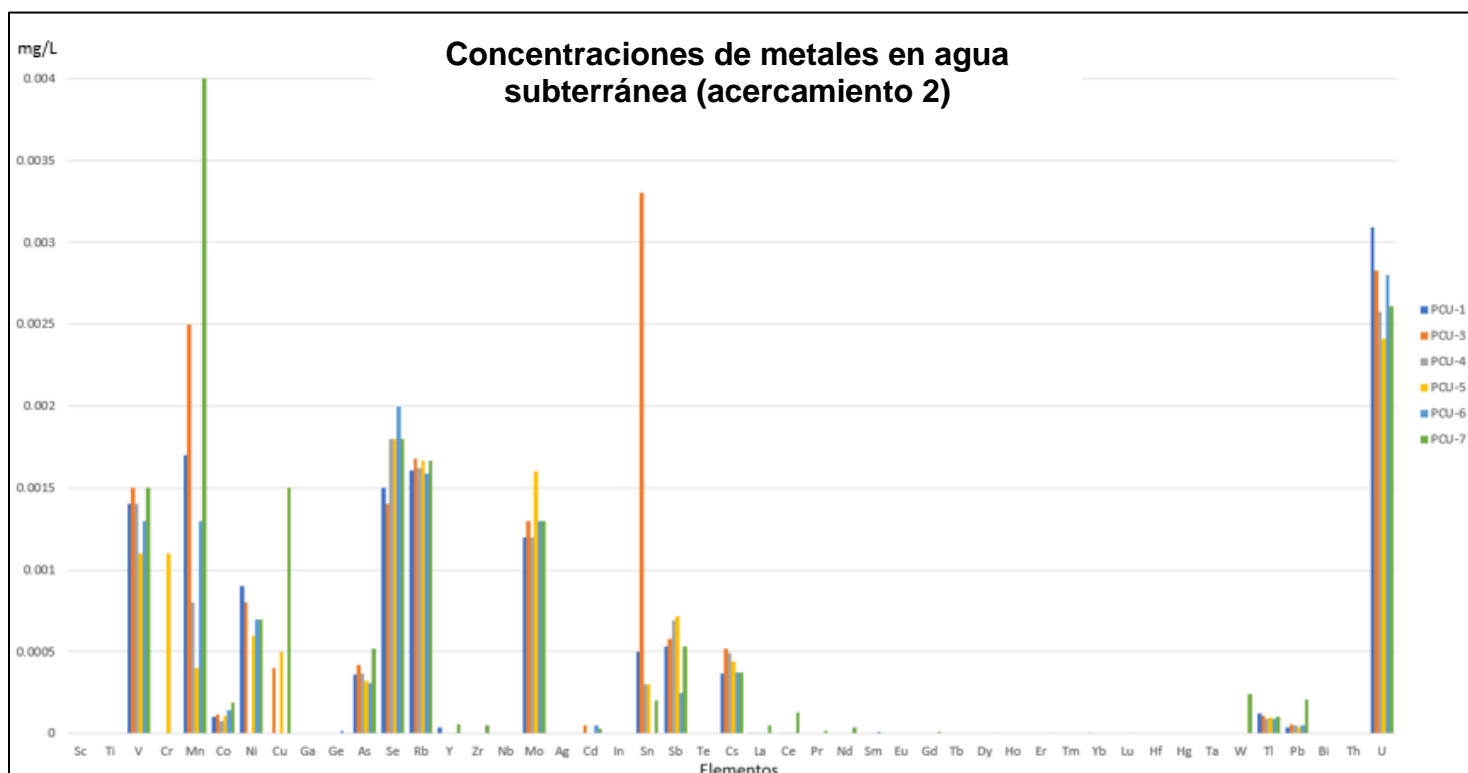


Figura 152. Concentraciones de metales en agua subterránea Zoom 2 (elaboración propia, 2021).

Gráficas de representación de las concentraciones de metales en suelos

En las siguientes gráficas de representación de las concentraciones de metales en suelos se puede observar que la mayor cantidad de iones se encuentra en los sitios de muestreo SCU-1 y SCU-2 que están ubicados al oeste de la zona de estudio colindando con la empresa acerera TERNIUM (Véanse figuras 153, 154 y 155). Es importante mencionar que los metales encontrados en el suelo corresponden a los encontrados en el agua subterránea, por lo cual se puede atribuir en gran parte a la infiltración de las partículas provenientes de las industrias del acero principalmente TERNIUM.

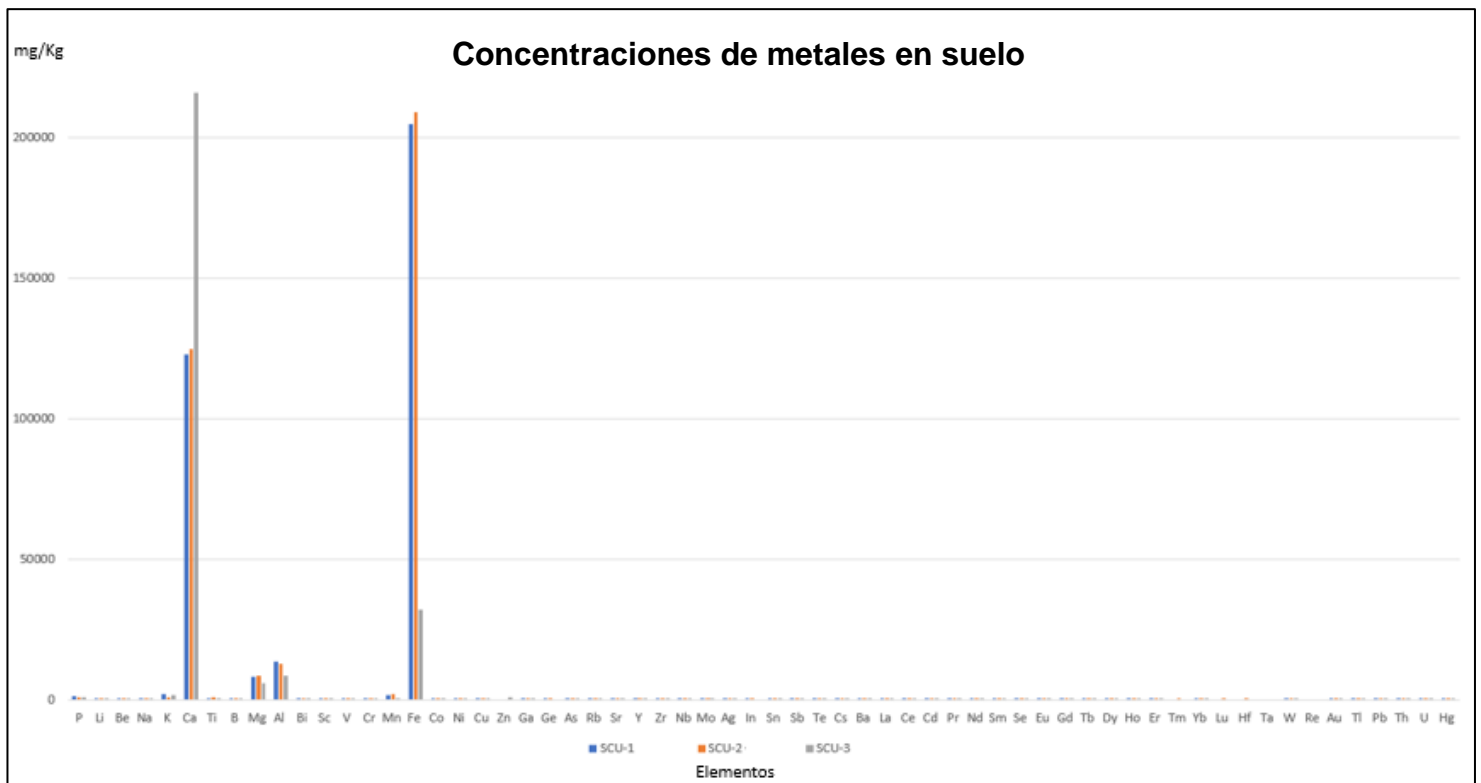


Figura 153. Concentraciones de metales en el suelo (elaboración propia, 2021).

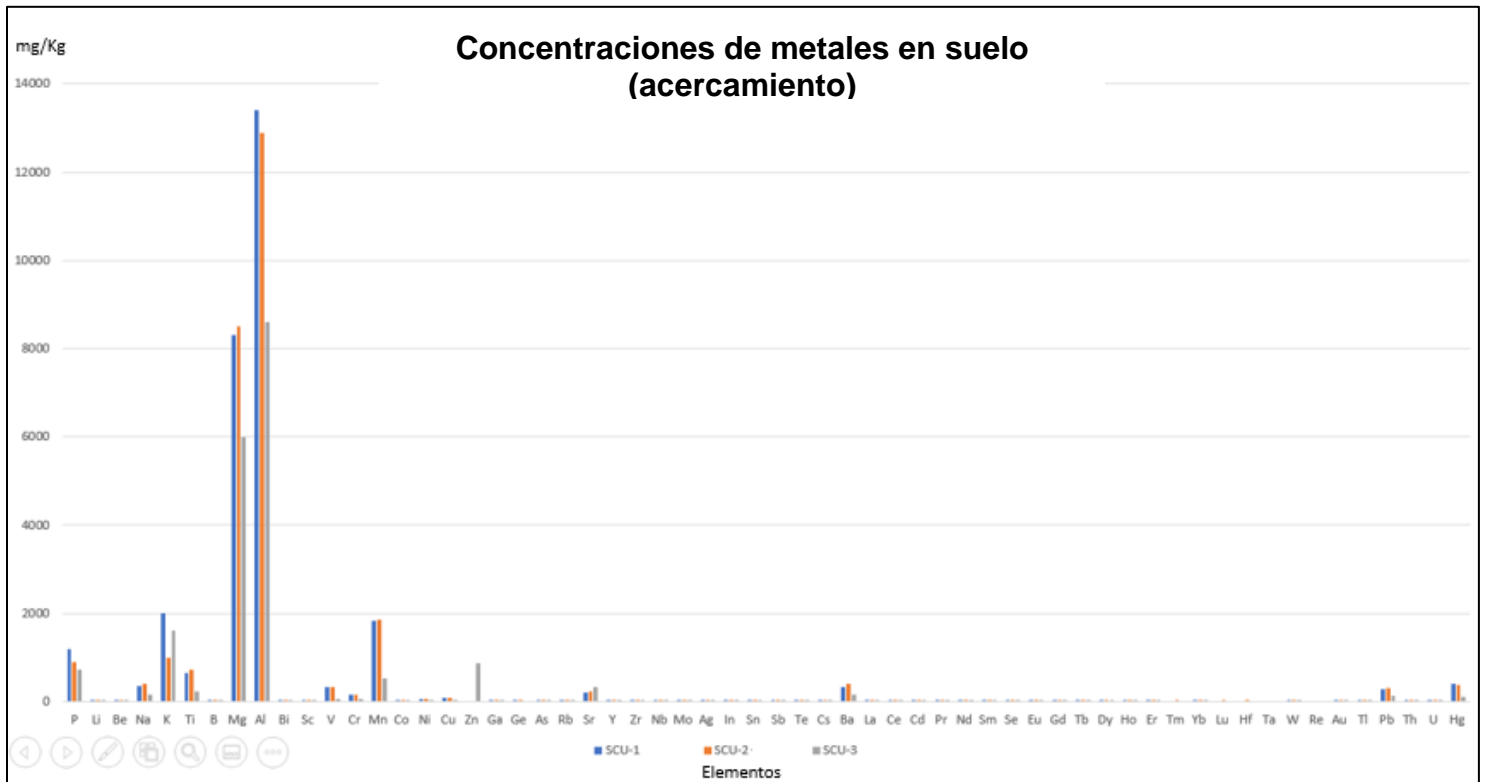


Figura 154. Concentraciones de metales en el suelo Zoom 1 (elaboración propia, 2021).

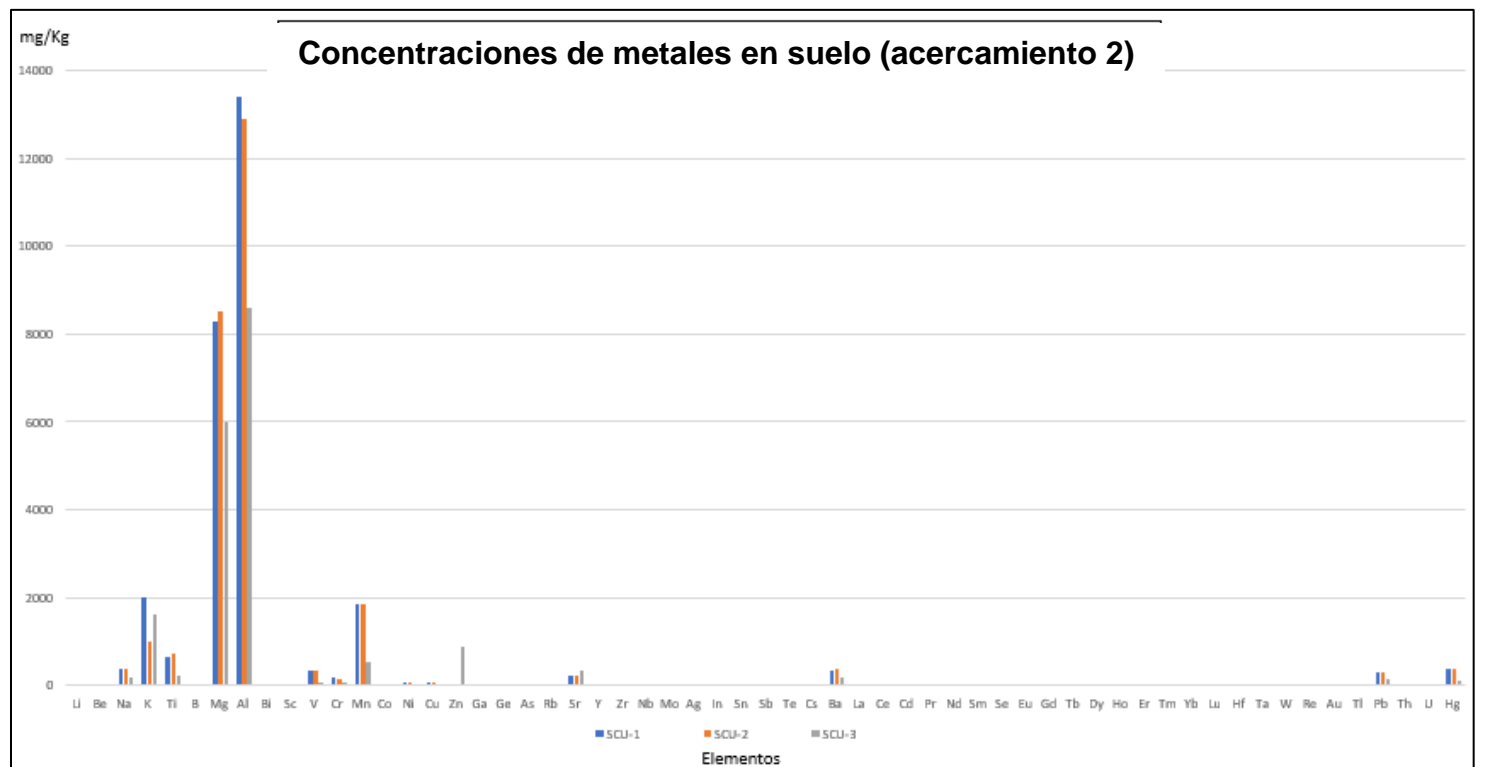


Figura 155. Concentraciones de metales en el suelo Zoom 2 (elaboración propia, 2021).

Representación de los niveles piezométricos

Con la finalidad de comprobar si las edificaciones Torre de la Rectoría, Estadio Universitario e Instituto de Ingeniería Civil estaban en contacto con el acuífero en estudio, se realizó una representación a escala de los niveles freáticos y las edificaciones (Véase figura 156), donde se observa que la Torre de la Rectoría podría tener contacto temporal con el agua subterránea, mientras que el Estadio Universitario al estar desplantado sobre terraplén no tiene contacto con el agua subterránea, por su parte el instituto de Ingeniería Civil se encuentra desplantado sobre el terreno natural pero a una distancia de más de 8 metros sobre el nivel freático lo cual indica que tampoco tiene contacto con el agua subterránea.

Los metales, la conductividad eléctrica y la temperatura se concentraron de manera general en los pozos PCU-1 y PCU-3, al noreste de la zona de estudio, coincidiendo con la dirección de flujo del agua subterránea.

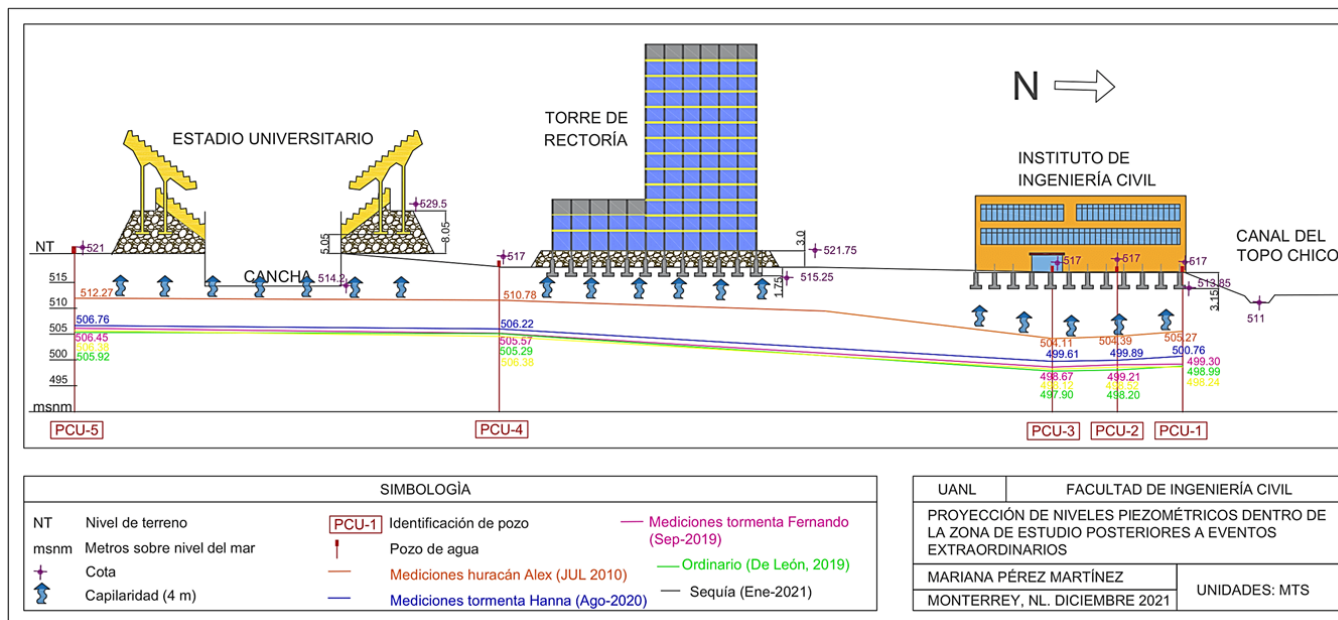


Figura 156. Representación de los niveles piezométricos en la zona de estudio (elaboración propia, 2021).

Afectación a las estructuras

Considerando los registros Cl^- y SO_4^{2-} registrados en 2016, según la Norma mexicana NMX-C-403-ONNCCE-1999 se clasificaría la exposición de las cimentaciones en contacto con el acuífero como **5a “agresividad química ligera”** (Véase Tabla 4 en la página 42), debido a que el rango de SO_4^{2-} para esta clase de exposición es de 200 – 600 mg/L y los SO_4^{2-} registrados presentan concentraciones de hasta de 462.5mg/L (Véase Tabla 26 en la página 76). En esta clase de exposición la norma mexicana indica el requisito de que se dosifique un concreto con resistencia a la compresión mayor o igual que 250 kg/cm² (Véase Tabla 5 en la página 42) y el uso de un cemento resistente a SO_4^{2-} (Véase Tabla 6 en la página 43).

Considerando la normativa internacional ACI 201 propuesta por el *American Concrete Institute*, de los diferentes tipos de ataques químicos que podrían sufrir las cimentaciones en estudio en caso de estar expuestas en época de huracanes a el agua subterránea con las concentraciones reportadas serían: **ataque químico por SO_4^{2-} provenientes de formas externas al concreto**, este tipo de ataque produce expansión y fisuración del concreto, así como ablandamiento y pérdida de resistencia; y **ataque por ácidos** producido por desechos de drenaje de minas o aguas industriales debido a que la zona está rodeada por industrias. El ACI 201 establece como requisito para este caso que el concreto tenga una resistencia a compresión ($f'c$) mínima de 280 kg/cm² y sea resistente a SO_4^{2-} (Véase Tabla 7 en la página 43).

El ACI 318 establece varios requisitos según la zona de exposición del concreto, clasificando la exposición al agua subterránea del campus de CU de la UANL como **P1** (en contacto con el agua donde se requiere baja permeabilidad), **S1** (moderado ataque por SO_4^{2-}) y **C2** (severa exposición a la humedad y a una fuente externa de Cl^-) requiriendo un concreto tipo II, resistente a SO_4^{2-} y una resistencia a compresión de 280 kg/cm².

Además, las estructuras podrían presentar **corrosión localizada** (por ataque de Cl^-) ya que los Cl^- existen en cantidades que superan los LMP de la NOM-127,

los estándares europeos EEC, y la OMS, (quienes recomiendan un límite de 250 mg/L); con valores de hasta 815.3 mg/L.

Según los planos oficiales de las edificaciones en estudio (Estadio Universitario, Torre de la Rectoría e Instituto de Ingeniería Civil), el concreto con el que se realizaron fue cemento portland ordinario y la resistencia a compresión con la que se diseñaron fue de 210 kg/cm² (comparado con 280 kg/cm²) por lo que en caso de estar las cimentaciones en constante contacto con el agua subterránea no se cumpliría con los requerimientos de las normativas antes mencionadas.

Considerando los niveles piezométricos observados en la figura anterior (Véase figura 156) se puede observar que la única estructura que podría tener contacto con el agua subterránea es la Torre de la Rectoría, sin embargo, dicho contacto sería temporal (condiciones de huracanes) y dependería a su vez de que las condiciones geológicas de la zona comprometida cumplieran con el ascenso capilar de al menos 4 metros (Véase Tabla 1 en la página 16).

Hablando de las afectaciones a las cimentaciones es importante mencionar que las concentraciones de Cl⁻ y SO₄²⁻ analizadas podrían tratarse de un suceso aislado (concentración puntual) debido a que solo se tiene el registro de un muestreo correspondiente al año 2016 y no se realizaron más análisis de Cl⁻ y SO₄²⁻ que pudieran referenciar su evolución.

Análisis estadístico de iones mayoritarios y de iones más relevantes

Se realizaron los diagramas de dispersión con la finalidad de representar la evolución de los muestreos realizados en los 3 diferentes años (2017, 2019 y 2021), además se calcularon las medias y las desviaciones estándar para cada ion en cada aprovechamiento hidráulico analizado. Para las concentraciones del año 2021 se calculó el promedio de los dos muestreos realizados en ese año (enero 2021 y junio 2021).

Na⁺

El ion Na⁺ fue detectado en concentraciones desde 26.3 hasta 118 mg/L, las concentraciones mas elevadas de Na⁺ se detectaron en los pozos PCU-1 y PCU-3 al noreste de la zona de estudio, el hecho de que las concentraciones mas elevadas se presenten en los pozos (PCU-1 y PCU-3) se puede atribuir a la dirección del flujo del agua que es de suroeste a noreste. La desviación estandar fue mayor en el pozo PCU-1, PCU-3 y PCU-6 lo cual indica que la dispersión entre las concentraciones de Na⁺ detectadas fue mayor en dichos aprovechamientos hidráulicos (Véase figura 157).

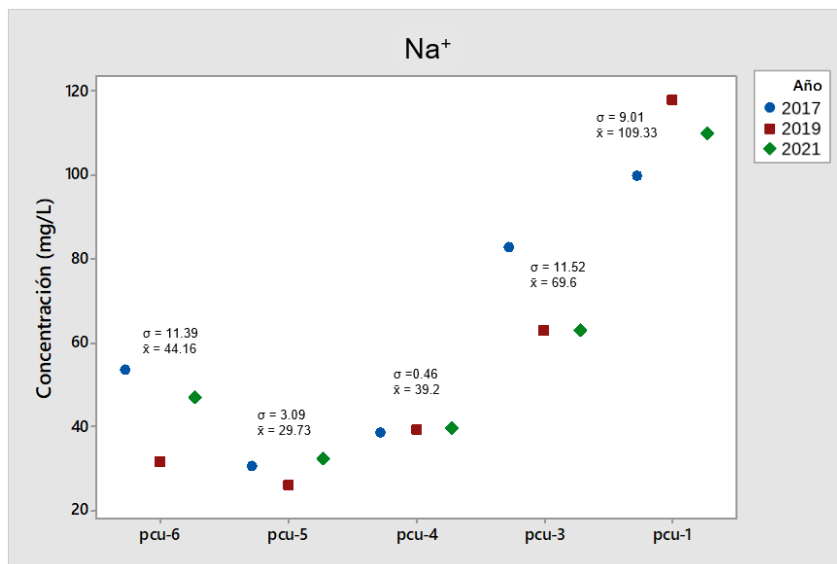


Figura 157. Evolución de concentración de Na⁺ desde el año 2017 hasta 2021 (elaboración propia, 2021).

K⁺

El ion de K⁺ se detectó en concentraciones desde 1.57 hasta 28.4 mg/L, las concentraciones más elevadas se identificaron al sur de la zona de estudio. Las desviaciones estándar más elevadas indican mayor dispersión entre los datos registrados en 2017 contra los registrados en 2019 y en 2021 (pozos PCU-5 y PCU-6), las altas concentraciones de K⁺ reportadas en 2017 podrían atribuirse a factores humanos, instrumentales o bien a un evento puntual de contaminación (Véase figura 158).

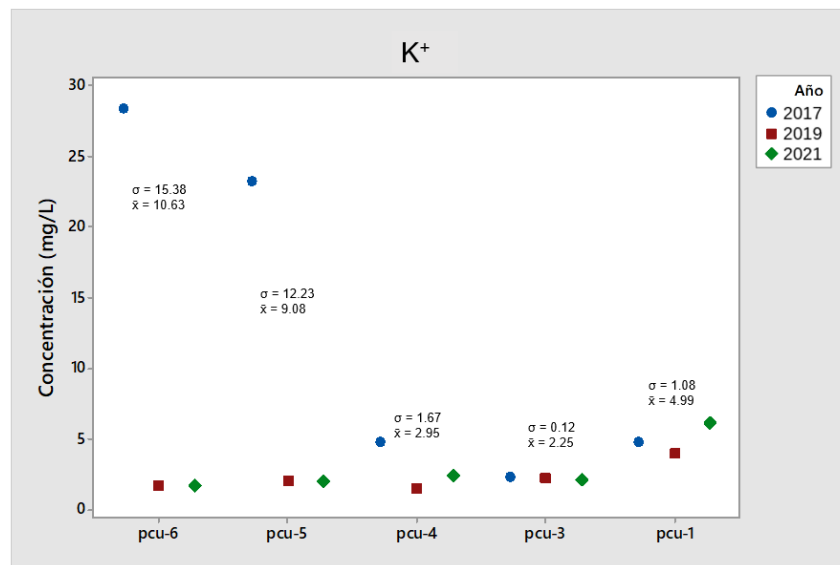


Figura 158. Evolución de la concentración de K⁺ desde el año 2017 hasta el 2021 (elaboración propia, 2021).

Ca²⁺

El Ca²⁺ se detectó con concentraciones desde 111.35 hasta 215.5 mg/L, las concentraciones más elevadas se detectaron en los pozos PCU-1 y PCU-3 al noreste de la zona de estudio, dicha concentración puede atribuirse a la dirección de flujo. La desviación estándar más elevada se presentó en el pozo PCU-5 indicando que en ese punto se presentó mayor dispersión en las concentraciones de Ca²⁺ (Véase figura 159).

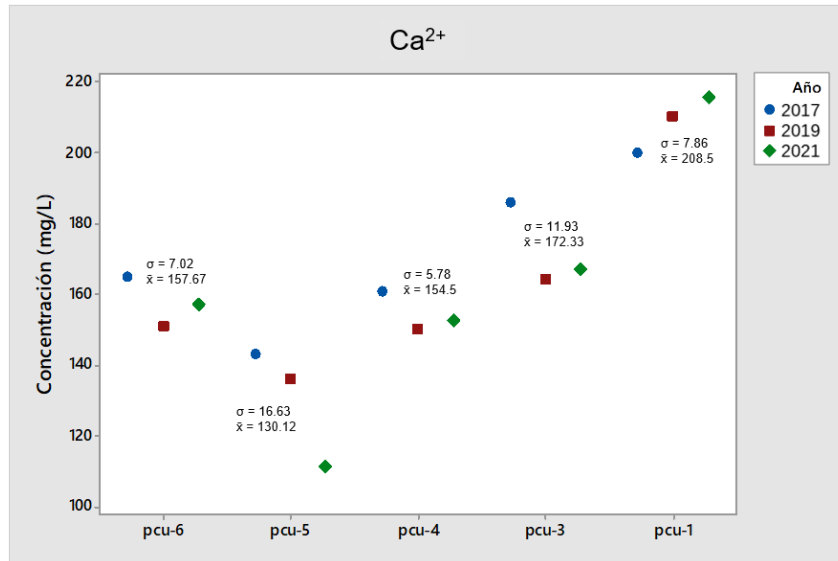


Figura 159. Evolución de la concentración de Ca^{2+} desde el año 2017 hasta el año 2021 (elaboración propia, 2021).

Mg^{2+}

El ion Mg^{2+} presentó concentraciones entre 24.0 y 37.9 mg/L, las concentraciones más elevadas de Mg^{2+} se detectaron en los pozos PCU-1 y PCU-3, dicha concentración puede atribuirse a la dirección de flujo del agua subterránea. El año 2017 reportó las concentraciones más elevadas de Mg^{2+} , en ese año también se reportaron las menores cantidades de precipitación, dicho fenómeno ambiental pudo atribuir al aumento de las concentraciones de Mg^{2+} (Véase figura 160).

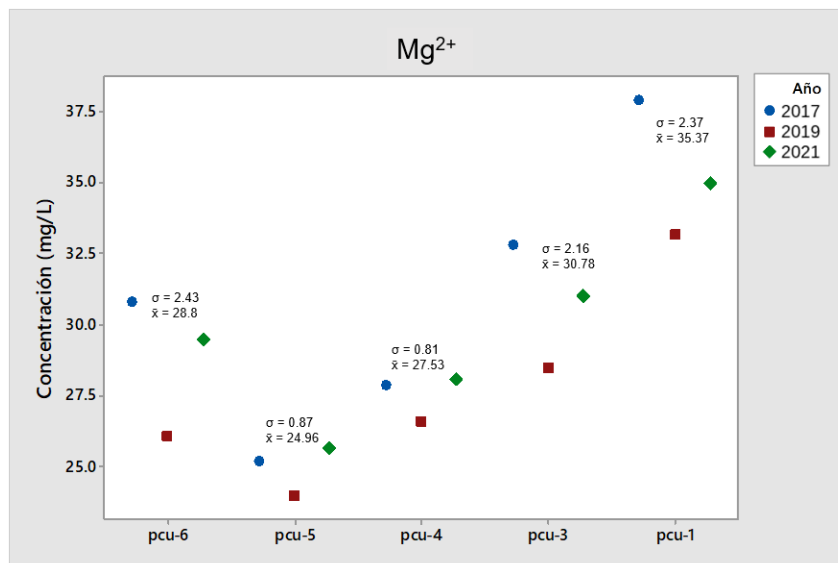


Figura 160. Evolución de Mg^{2+} desde el año 2017 hasta el año 2021 (elaboración propia, 2021).

Al³⁺

El ion Al³⁺ se detectó en concentraciones bajas a comparación con el LMP establecido por las normativas nacionales e internacionales (0.2 mg/L), Las concentraciones más elevadas de Al³⁺ se presentaron en los pozos PCU-6, PCU-5 y PCU-4, siendo este último aprovechamiento hidráulico el que presento la concentración más elevada del ion con valor de 0.18mg/L, muy cercano al LMP. Las desviaciones estándar más elevadas se presentaron en los pozos PCU-6, PCU-5 y PCU-4 podrían atribuirse a factores humanos, instrumentales o bien a un evento puntual de contaminación proveniente de las industrias del acero (Véase figura 161).

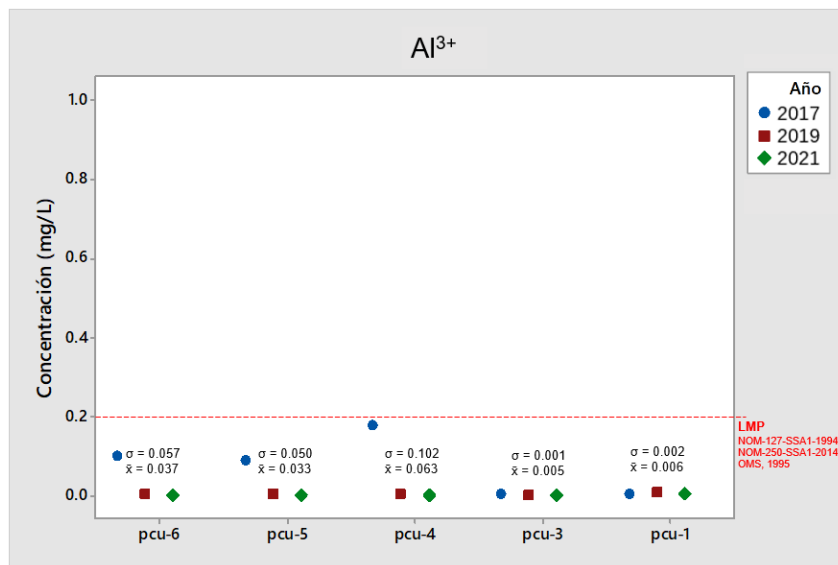


Figura 161. Evolución de concentraciones de Al³⁺ desde el año 2017 hasta el 2021 (elaboración propia, 2021).

Mn²⁺

El Mn²⁺ no sobrepasó los LMP de agua potable en los análisis del 2019 y 2021, sin embargo, en 2017 se reportaron concentraciones que superaban los LMP en los pozos PCU-6, PCU-5 y PCU4, la concentración mayor se detectó en el PCU-4, sitio de muestreo que se encuentra más cercano a la industria del acero TERNIUM, no obstante, las altas concentraciones de Mn²⁺ podrían atribuirse a factores humanos, instrumentales o bien como ya se mencionó anteriormente a un evento puntual de contaminación proveniente de las industrias del acero (Véase figura 162).

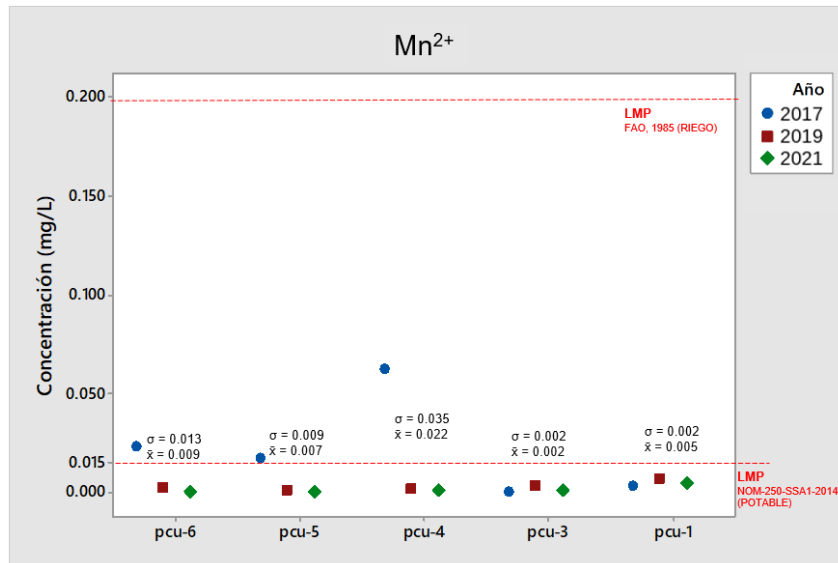


Figura 162. Evolución de concentraciones de Mn^{2+} desde el año 2017 hasta el 2021 (elaboración propia, 2021).

Fe³⁺

El Fe^{3+} sobrepasó el LMP de agua potable en el sitio de muestreo PCU-6, PCU-5 y PCU-4, al igual que en el caso del Al^{3+} y Mn^{2+} la concentración mayor se detectó en el PCU-4, sitio de muestreo que se encuentra más cercano a la industria del acero TERNIUM, no obstante, las altas concentraciones de Mn^{2+} podrían atribuirse a factores humanos, instrumentales o bien como ya se mencionó con anterioridad a un evento puntual de contaminación proveniente de las industrias del acero (Véase figura 163).

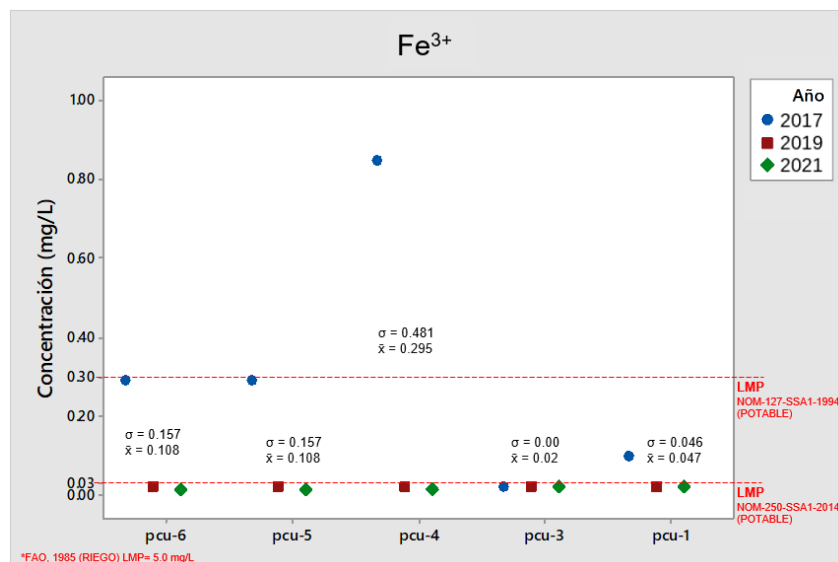


Figura 163. Evolución de concentraciones de Fe^{3+} desde el año 2017 hasta el 2021 (elaboración propia, 2021).

CAPÍTULO 5 (CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES)

La zona de estudio está localizada sobre un depósito de gravas, arenas, limos y arcillas, sobre el cual se desplantan las cimentaciones del Estadio Universitario, la Torre de la Rectoría y el Instituto de Ingeniería Civil. Las propiedades geológicas naturales de la zona de estudio no deberían presentar metales, el haber encontrado cantidades significativas de éstos en los suelos, nos indica que dichos residuos son provenientes de las industrias del acero aledañas a la zona de estudio.

Los niveles freáticos del acuífero dinámico y permeable varían de 12 a 16 metros, con niveles piezométricos que varían desde 497 hasta 512 metros, la dirección del flujo es suroeste a noreste y no tiene contacto directo con las cimentaciones, sin embargo, considerando la capilaridad de aproximadamente 4 metros, se considera que la Torre de la Rectoría desde hace 60 años de su construcción, podría tener contacto temporal con el agua subterránea sobre todo, en eventos hidrometeorológicos extraordinarios (huracanes), mientras que las cimentaciones del Estadio Universitario y el Instituto de Ingeniería Civil no tienen interacción con los niveles freáticos.

En el caso de los iones metálicos en el agua subterránea, en el 2017 se reportó que el Fe^{3+} , Al^{3+} , Mn^{2+} sobrepasaron los LMP; en 2019 se reportó que ningún ion metálico sobrepasó los LMP, sin embargo, los iones Cd^{2+} , Ba^{2+} y Fe^{3+} tuvieron concentraciones muy cercanas a ellos; en los análisis realizados durante esta investigación solamente el Fe^{3+} sobrepasó los LMP establecidos por las normativas; sin embargo en las campañas de muestreos realizadas desde el año 2017 hasta el 2021, los análisis de resultados mostraron concentraciones de 59 metales en el agua subterránea. Sin embargo, éstos no se encontraron en concentraciones altas que pudieran alterar la acidez del agua subterránea y a la vez corroer y degradar las cimentaciones. La normatividad establece un pH mínimo de 6.5 y un máximo admisible de 8.5, mientras que nuestros valores son de 6.7 - 7.2.

Se logró apreciar una relación entre las concentraciones de metales en el agua subterránea y las precipitaciones cercanas a las fechas del muestreo, debido a que a mayor volumen de agua en el acuífero los contaminantes se encuentran más disueltos y dispersos por lo que sus concentraciones se ven reducidas; a su vez en los pozos donde se encontraron mayores concentraciones de metales, se obtuvieron mayores valores de conductividad eléctrica, temperatura y pH ligeramente más ácido.

En las campañas de muestreo de los suelos se encontraron cantidades importantes de todos los metales analizados, por lo que más de 20 iones superaron los LMP. Es importante mencionar que los metales encontrados en el suelo son los mismos encontrados en el agua subterránea, lo cual indica que los residuos metálicos de las industrias aledañas se depositan en los suelos de la zona de estudio y se infiltran en el acuífero permeable hacia el agua subterránea. Las concentraciones más elevadas de metales en los suelos se encontraron a 30 metros al oeste de la industria del acero Ternium.

Aun y cuando las concentraciones de Cl^- y SO_4^{2-} indican un ambiente agresivo según las normativas ACI, no se puede determinar la afectación de corrosión y degradación a las cimentaciones de las estructuras; sin embargo, podría haberse iniciado un proceso de corrosión por exposición temporal en los 60 años de vida de la Torre de la Rectoría.

Con los resultados de la evolución hidrogeoquímica e hidrogeológica del acuífero realizada en esta investigación, se pudo observar que las concentraciones de los metales se mantienen presentes en todo momento, pero en diferentes puntos y concentraciones, debido a que el acuífero está en constante movimiento y sus propiedades químicas varían con el paso del tiempo; ya que dependen de factores naturales, hidrometeorológicos y antropogénicos.

Concluyendo así, que en el periodo estudiado en esta investigación desde el año 2016 hasta el 2021 no existe afectación importante de los contaminantes encontrados en el agua subterránea hacia las cimentaciones de las edificaciones universitarias (Estadio Universitario, Torre de la Rectoría e Instituto de Ingeniería Civil), pero en algún futuro próximo podrían existir afectaciones a las cimentaciones de las edificaciones en estudio y aledañas, debido al aumento gradual de las concentraciones de los contaminantes disueltos en el agua subterránea estudiados.

RECOMENDACIONES

- Realizar monitoreos y muestreos permanentes en los aprovechamientos hidráulicos disponibles en la zona de estudio con la finalidad de identificar y cuantificar los contaminantes presentes y su impacto ambiental.
- Realizar muestreos de suelos a distintas profundidades con la finalidad de identificar el impacto de la infiltración de los contaminantes hacia el acuífero.
- Realizar análisis de Cl^- y SO_4^{2-} al agua subterránea de la zona de estudio con la finalidad de identificar si las concentraciones aumentan con el paso del tiempo.
- Realizar sondeos exploratorios para verificar el estado de las cimentaciones de la Torre de la Rectoría de la UANL que tienen más de 60 años de antigüedad.

BIBLIOGRAFÍA

- ACI 201. (2001). Guía para la Durabilidad del Hormigón. *Durabilidad Del Hormigon*, 1–59.
https://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/ACI_201_2R_01.pdf
- Alva, E., De León, H., & Werner, J. (1998). Aspectos hidrogeoquímicos del acuífero de gravas de la región noroeste del área metropolitana de Monterrey. *Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung*, 1, 6.
- American Concrete Institute. (2008). ACI 318S/318SR-05 Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario. *Director*, 520.
- Andrade, M. del C. (1989). Manual Inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras. In ACOR (Ed.), *Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas* (Vol. 53, Issue 9).
- Andrés, C., Luis, L., Rafael, Z., Ortega, R., Alicia, M., Pérez, R., Ricardo, E., Gonzalo, S., Kuri, H., Pineda, N., & Caldera, R. P. A. (2017). *El agua en México* (1st ed.).
- APHA. (1995). Standard Methods for the Examination for Water Wastewater. In *American Public Health Association*.
- ATSDR. (2021). *Agency for Toxic Substances and Disease Registry*. U.S. Department of Health & Human Services. <https://www.atsdr.cdc.gov/>
- Barros, H., Castro de Esparza, M., Wong, M., & Mori, V. (2009). Espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado. In Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos. *Congreso Iberoamericano de Ciudades Inteligentes (CYTED)*, 1, 113–138.
<https://www.argentina.gob.ar/cnea/cab/laboratorios-e-instalaciones/quimica/espectrometria-icp>
- Calleja, J. (1966). Corrosión de armaduras en los hormigones armados y pretensados. *Informes de La Construcción*, 18, 628.
- Castaño, S. (2003). VERTEDEROS E IMPACTO SOBRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS. *Instituto Geológico y Minero de España*, 23, 10.
<http://riubu.ubu.es/bitstream/10259.4/2495/1/Castaño-Vertederos.pdf>
- Catalán, J. (1981). *Química del agua* (P. editors S.L. (Ed.); 3rd ed.).
- Cervantes, L. (1960). *Departamento de Construcción y Mantenimiento de la UANL*.
- CNA. (2017). *Estadísticas del agua en México*. www.gob.mx/conagua
- CONAGUA. (2015). PMPMS para usuarios urbanos de agua potable y saneamiento. *Comisión Nacional Del Agua*, 94.
- CONAGUA. (2016). ATLAS DEL AGUA EN MÉXICO 2016. *SEMARNAT*, 140.
<https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/05/atlas-del-agua-en-mexico-2016.pdf>
- CONAGUA. (2018). *Agua. Cuéntame de México*. Estadísticas Del Agua En México 2018. . <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/usos.aspx>
- Cuesta, M. M., Fernández, P. C., & Tajadura, J. J. D. (2020). Espectrometría de Masas de Plasma (ICP-MS). *Universidad de Burgos*, 74.
https://www.mendeley.com/catalogue/31e58046-82ad-3bc3-83f3-872bbcab9329/?utm_source=desktop&utm_medium=1.19.8&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId=%7B8de7cfad-41ee-35d3-8cc3-b5ae5e318de4%7D

- Custodio & LLamas, E. & M. (1983). *HIDROLOGÍA SUTERRÁNEA* (OMEGA (Ed.); Segunda ed).
- Davis, S., & De Wiest, R. (1966). *Hydrogeology* (Wiley. 1966 (Ed.)). Universidad de Michigan.
- De León, H. (2019). *Evolución hidrogeológica del acuífero de Ciudad Universitaria y su impacto en las cimentaciones de la UANL (tesis de licenciatura)*. Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- Duque, G. (2003). *Manual de Geología para Ingenieros* (p. 480).
https://www.academia.edu/11213267/Manual_de_Geología_para_Ingenieros_Gonzalo_Duque_Escobar_
- Echarrí, L. (1998). Las Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. In Tedie (Ed.), *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* (Vol. 1, Issue 2).
- ECOFLUIDOS, I. (2012). Estudio De La Calidad De Fuentes Utilizadas Para Consumo Humano Y Plan De Mitigación Por Contaminación Por Uso Doméstico Y Agroquímicos En Apurimac Y Cusco. *Ecofluidos Ingenieros S.A.*, 105. <https://www1.paho.org/per/images/stories/PyP/PER37/15.pdf>
- Facultad de Ingeniería Civil. (2020). *Instituto de Ingeniería Civil*.
<http://fic.uanl.mx/iic/>
- Fagundo, J. (1996). PROCESOS GEOQUÍMICOS Y CALIDAD DE LAS AGUAS. *Centro Nacional de Investigaciones Científicas*, 198.
http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/1996_Fagundo_Procesos_Geoquimicos.pdf
- Fuentes, J. L. (1993). Aguas subterráneas. *Secretaría General de Estructuras Agrarias. Madrid, España: Rivadeneyra*, 0(1), 32.
<https://aguassubterranas.abas.org/asubterranas/article/view/23153>
- García, J. (2017, August 10). *El agua y su influencia en el medio ambiente – Agua.org.mx*. <https://agua.org.mx/agua-influencia-en-medio-ambiente/>
- García, S. (2017). *Análisis hidrogeológico e hidrogeoquímico del Campus Ciudad Universitaria de la UANL; como aporte para el manejo sostenible del agua subterránea* [Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León. México].
<https://cd.dgb.uanl.mx/bitstream/handle/201504211/16785/21351.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Garza, G. (1975). *Edificio para el Instituto de Ingeniería Civil* (Issue 81, p. 80201141). Dirección de Planeación y Construcción de Obras Nuevas.
- Gómez, J., & Sanz, D. (2013). *Inventario de los manantiales que aportan agua al río Júcar en la provincia de Albacete y su descripción hidrogeológica*. November 2017.
- Gómez, K. (2014). *Comportamiento Electroquímico del Acero de Refuerzo en el Hormigón con Adición de Escoria de Cobre bajo un ambiente salino*. Universidad Austral de Chile.
- González de la Cotera, M. (1991). Ataque químico al concreto. *Exposición En El Ciclo Organizado Por El ACI , Capítulo Peruano Sobre Corrosión En Estructuras de Concreto*, 18.
- González, J. A. (1989). *Control de la corrosión. Estudio y medida por técnicas electroquímicas* (C. N. de I. M. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Ed.)).

- Güler, C., Thyne, G. D., McCray, J. E., & Turner, A. K. (2002). Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal* 2002 10:4, 10(4), 455–474. <https://doi.org/10.1007/S10040-002-0196-6>
- Hernández, L. (1999). *Caracterización del acuífero de Ciudad Universitaria de la Universidad Autónoma de Nuevo León*. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, México.
- Hernández, M., & Martínez, P. (2010). Inicio de las obras de la torre de Rectoría. *Memorias de La UANL* 2010, 3–7.
- HikersBay. (2018). *Climatología*. <http://hikersbay.com/?lang=es>
- Kosmatka, S. H. K. W. et al. (2004). Diseño y control de mezclas de Concreto. In *Journal of Experimental Botany: Vol. Primera Ed.* https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/54593011/Diseno_y_control_de_mezclas_de_concreto_-_PCA.pdf?response-content-disposition=inline%3Bfilename%3DPortland_Cement_Association.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53
- López, J., García, O., Grima, J., Ballesteros, B., & Pérez, M. (2010). Técnicas de biorrecuperación in situ en acuíferos contaminados por metales pesados. *Instituto Geológico y Minero de España. Oficina de Proyectos de Valencia*, 233–243.
- Madero, A., Sada, M. de la L., Ramírez, L., Magdalena, R., Pérez, A., Barragán, A., Velazco, C., de León, H., Cuéllar, L. G., & Treviño, N. (2017). *Nuevo León y sus recursos naturales. Una antología crítica* (Fondo Editorial de Nuevo León y Secretaría de Desarrollo Agropecuario (Ed.)). <https://www.fondoeditorialnl.gob.mx/producto/nuevo-leon-y-sus-recursos-naturales-una-antologia-critica/>
- Martínez, G. (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). In *Martínez, Glenda*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- McCullough, J., Hazen, T., Benzoni, S., Blaine, F., & Palmisano, A. (1999). Bioremediation of metals and radionuclides. In *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. <https://doi.org/10.1525/9780520911482-020>
- Michalzik, D. (1988). *Trias bis teifste Unterkreide der nordöstlichsten Sierra Madre Oriental, Mexiko, Fazielle Entwicklung eines passiven Kontinentalrandes: Darmsatdt, Hesse, Alemania*. Universidad Técnica de Darmstadt.
- Michigan State University. (1991). Environmental Health & Safety. *Water Quality Bulletin*, 35. <https://ehs.msu.edu/enviro/whpp/wh-17glossary.html>
- Ministerio de Salud. (2005). Reglamento para la Calidad del Agua Potable DECRETOS N° 32327-S. In *La Gaceta No. 84* (Issue 84, pp. 1–16). [https://www.aya.go.cr/laboratorio/selloCalidad/requisitosGalardon/DecretoEjecutivoNo38924-S.Reglamento para la calidad del agua potable.pdf](https://www.aya.go.cr/laboratorio/selloCalidad/requisitosGalardon/DecretoEjecutivoNo38924-S.Reglamento%20para%20la%20calidad%20del%20agua%20potable.pdf)
- Mora, A., Rosales-Lagarde, L., Hernández-Antonio, A., & Mahlke, J. (2017). Hydrogeochemistry of Groundwater Supplied to the City of Monterrey, Mexico. In *Procedia Earth and Planetary Science* (Vol. 17, pp. 356–359). <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.090>

- Morales-Durán, N., De La Torre-González, A., García-Sánchez, V., & Chávez, C. (2018). Estudio de la calidad bacteriológica y parámetros fisicoquímicos del agua del Distrito de Riego 023. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(1), 53–67. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-01-04>
- Naciones Unidas. (2021). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021. UNESCO. www.unwater.org.
- NMX-C-403-ONNCCE-1999. (n.d.). In *Industria de la construcción - Concreto hidráulico para uso estructural*.
- ONU. (2013). *DMH 2010 Día Mundial del Hábitat 2010. 2010*.
- ONU. (2019). *Las 10 mejores infografías de 2019 - EL ÁGORA DIARIO*. Objetivos Del Desarrollo Sostenible. <https://www.elagoradiario.com/especiales/mejores-infografias-2019/>
- Pérez, M. (2019). *HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS POR CONTAMINACIÓN INDUSTRIAL Y SU IMPACTO EN LAS CIMENTACIONES DE LOS EDIFICIOS UNIVERSITARIOS*. Facultad de Ingeniería Civil, UANL.México.
- PureWater. (2019). *¿Qué es el pH del agua?* Tecnología En Tratamiento de Aguas. <https://purewater.com.co/que-es-el-ph-del-agua/>
- Rigola, M. (1990). *TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES : AGUAS DE PROCESO Y RESIDUALES -*. [https://books.google.com.ec/books?id=fQcXUq9WFC8C&pg=PA73&dq=resinas+de+intercambio+ionico&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwikq5312M_pAhUjVt8KHdLPD54Q6AEITDAF#v=onepage&q=resinas de intercambio ionico&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=fQcXUq9WFC8C&pg=PA73&dq=resinas+de+intercambio+ionico&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwikq5312M_pAhUjVt8KHdLPD54Q6AEITDAF#v=onepage&q=resinas+de+intercambio+ionico&f=false)
- Rodríguez, J. (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. *Revista Pensamiento Actual (San José)*, 9(12), 125–134.
- Rogelio, G. (2021). UANL Informe 2021. *Universidad Autónoma de Nuevo León*.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). Propiedades Físicas del Suelo. In *Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas*. <https://doi.org/10.1039/TF9686403358>
- SEDAGRO. (2000). *Geografía*. AGRO-NL.
- SEMARNAT. (2012). Informe de la Situación del Medio Ambiente en Mexico. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, 258–259. <http://www.semarnat.gob.mx>
- SMN. (2021). *Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia*. Servicio Meteorológico Nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>
- Snoeyink, D. (1999). *Química del agua* (Limusa (Ed.)).
- Weather Spark. (2021). *El clima en Monterrey, el tiempo por mes, temperatura promedio (México)*. Weather Spark. <https://es.weatherspark.com/y/5154/Clima-promedio-en-Monterrey-México-durante-todo-el-año>
- Werner, J. (1996). *Introducción a la hidrogeología*.

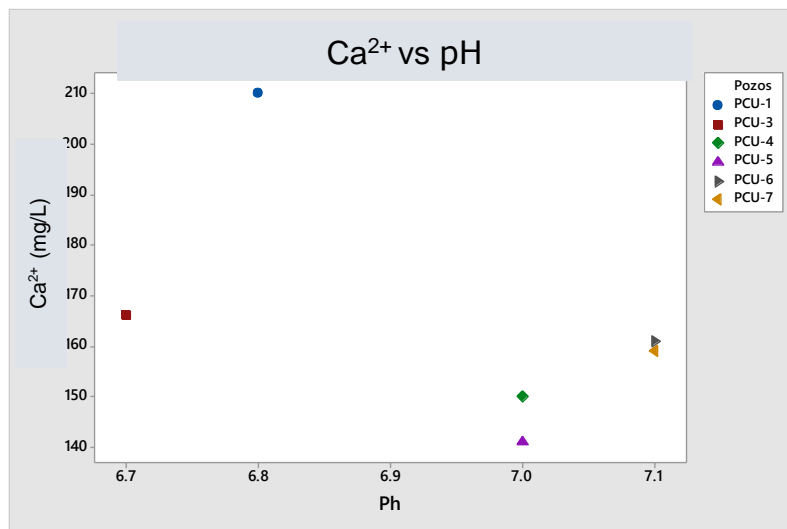
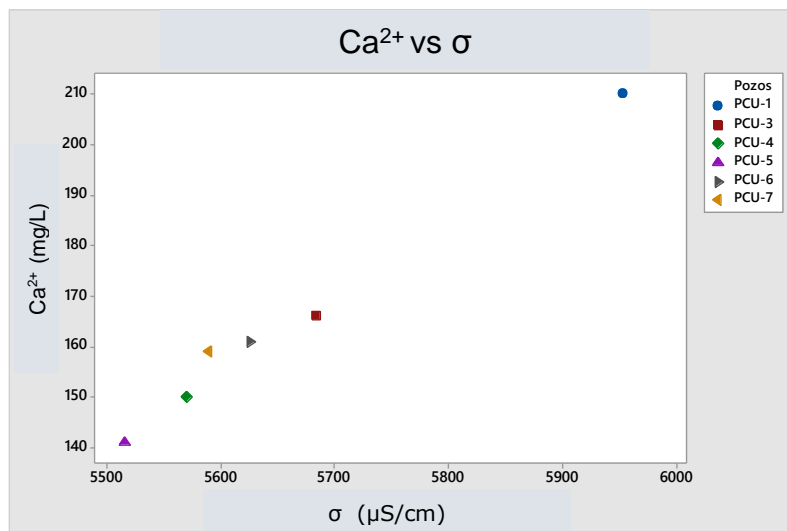
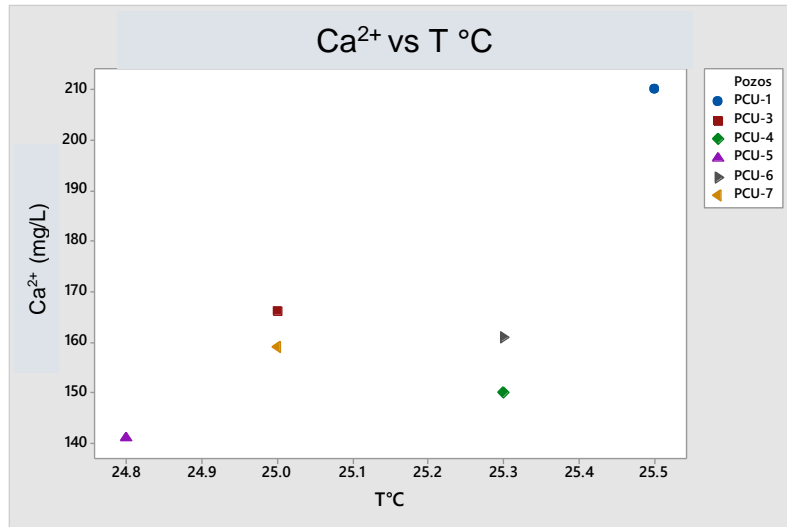
- WRG. (2012). *The Water Resources Group - Background, Impact and the Way Forward*. January, 85.
http://www3.weforum.org/docs/WEF/WRG_Background_Impact_and_Way_Forward.pdf
- Google. (s.f.). [Mapa de Campus Ciudad Universitaria UANL, México en Google earth]. Recuperado el 15 de abril, 2021.
- NMX-AA-132-SCFI-2016, Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra, México.
- NOM-230-SSA1-2002, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo, México.
- OMS. (2011). Guías para la calidad del agua de consumo humano. Organización Mundial de La Salud, 4, 608.
<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ANEXOS

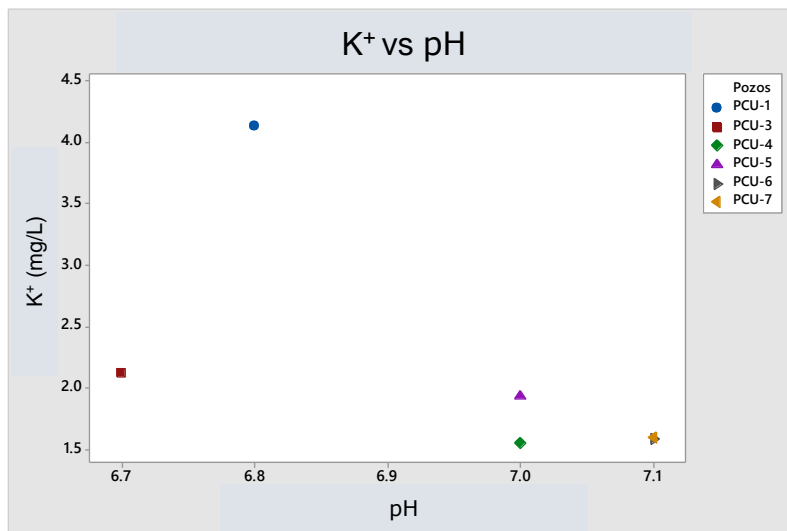
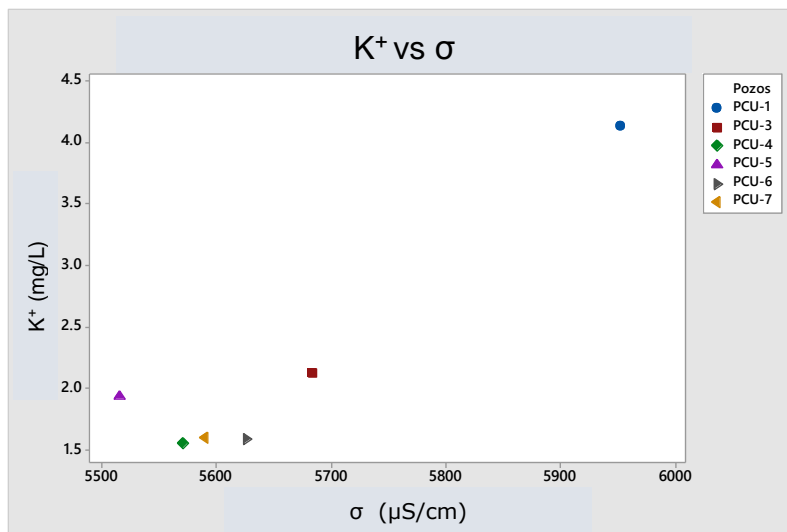
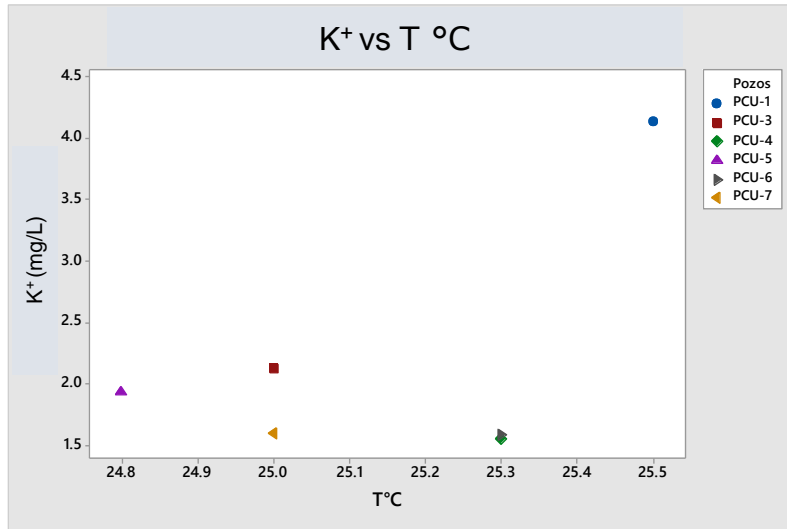
ANEXO A

Parámetros fisicoquímicos vs iones mayoritarios analizados (muestreo 1)

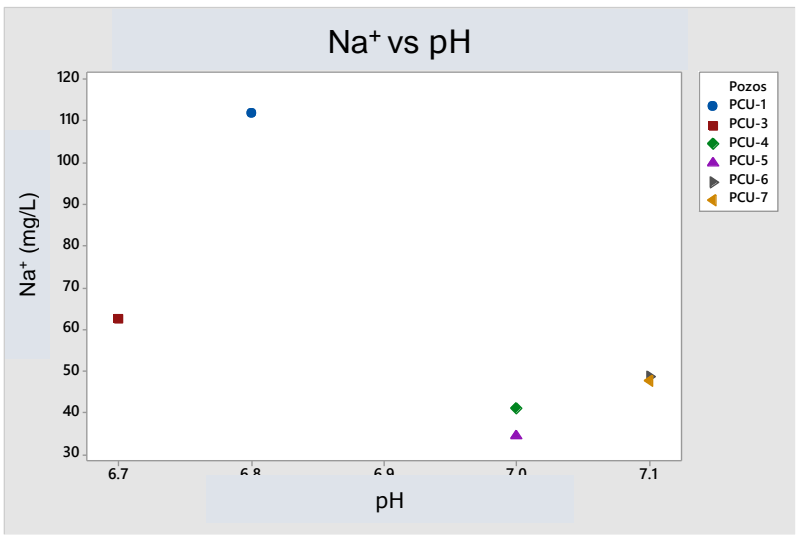
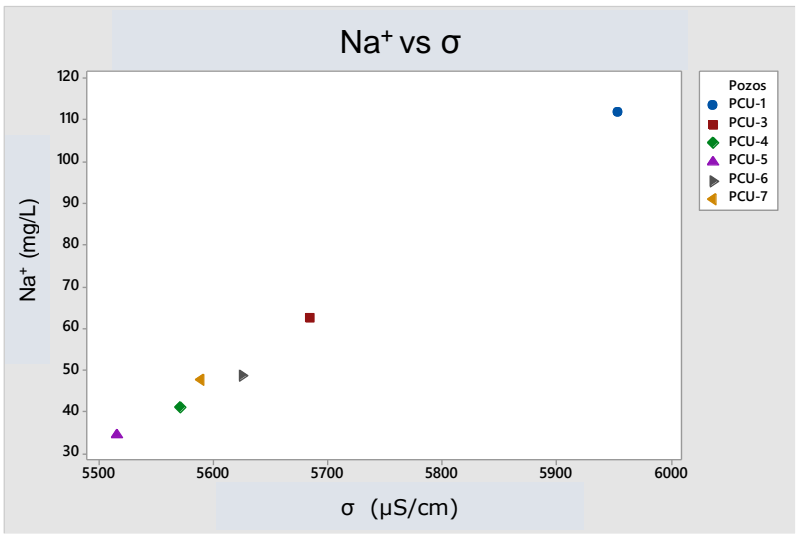
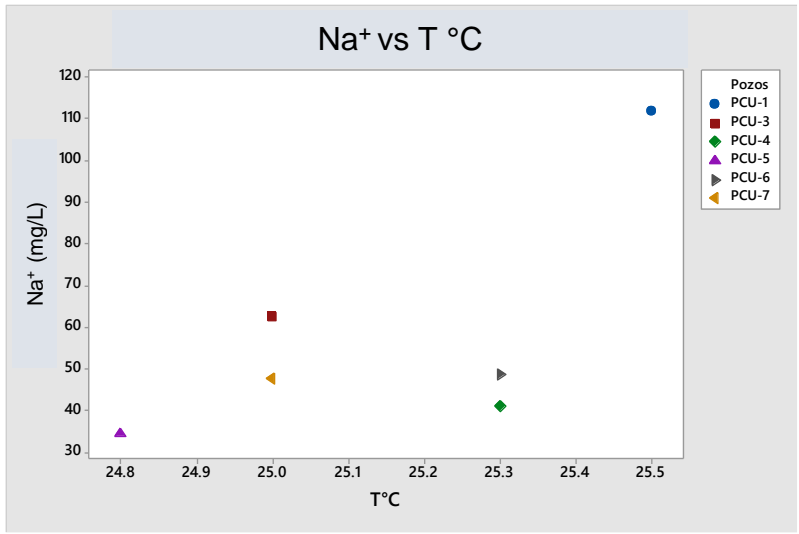
➤ Ca^{2+}



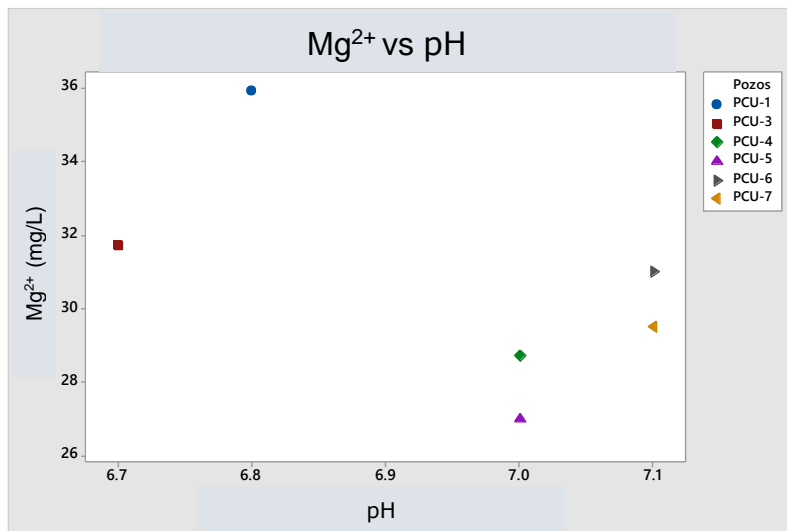
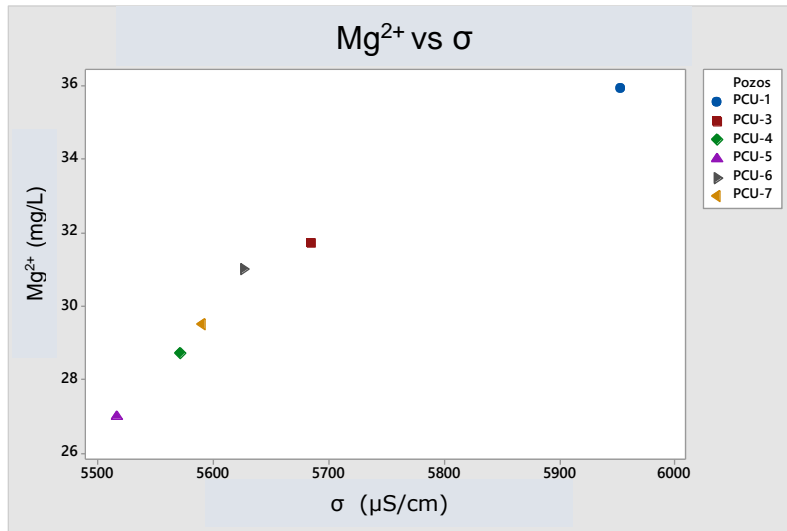
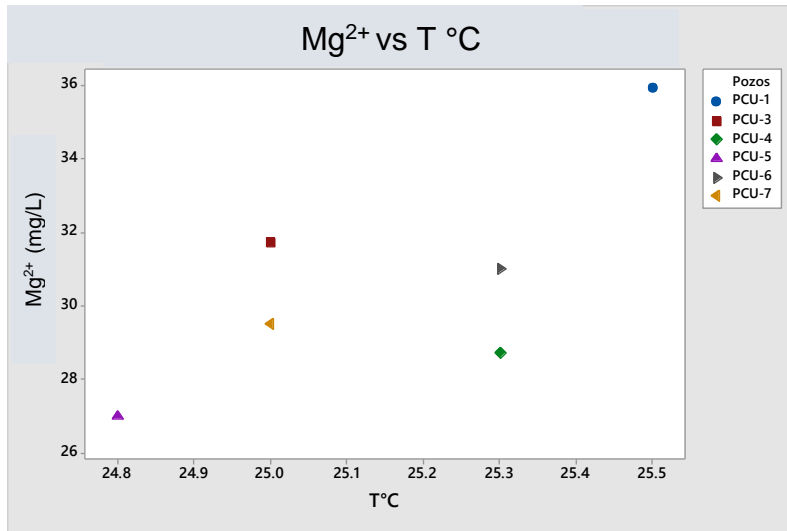
➤ K^+



➤ Na⁺

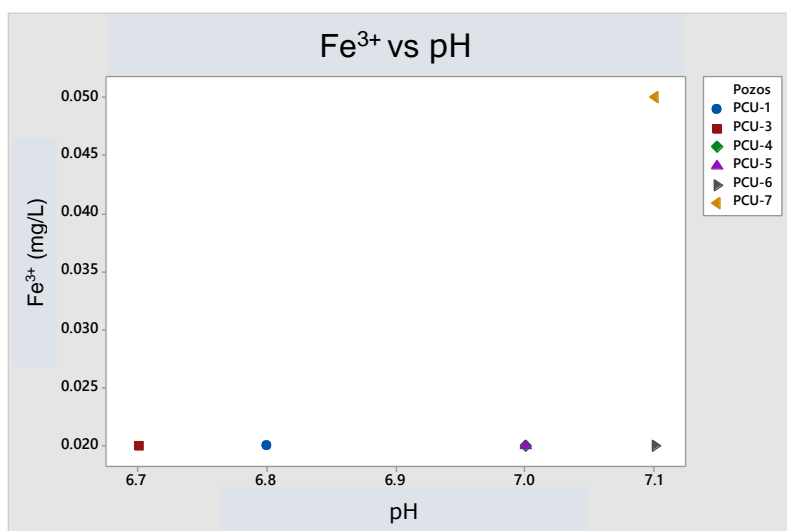
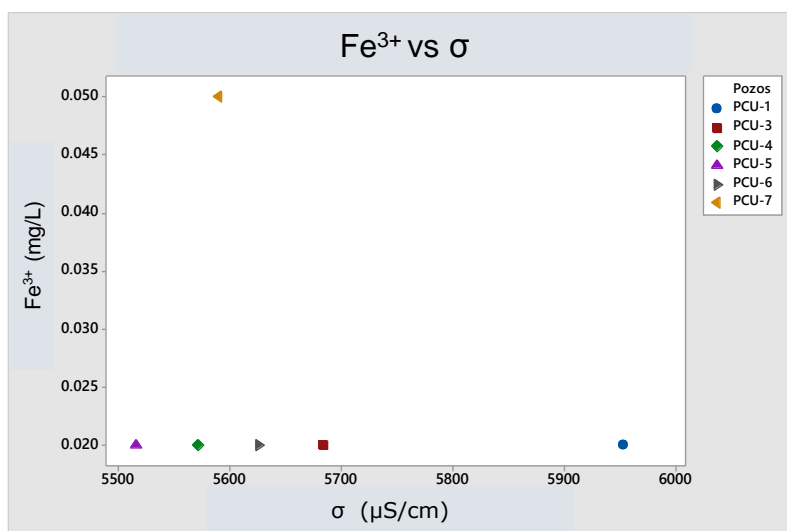
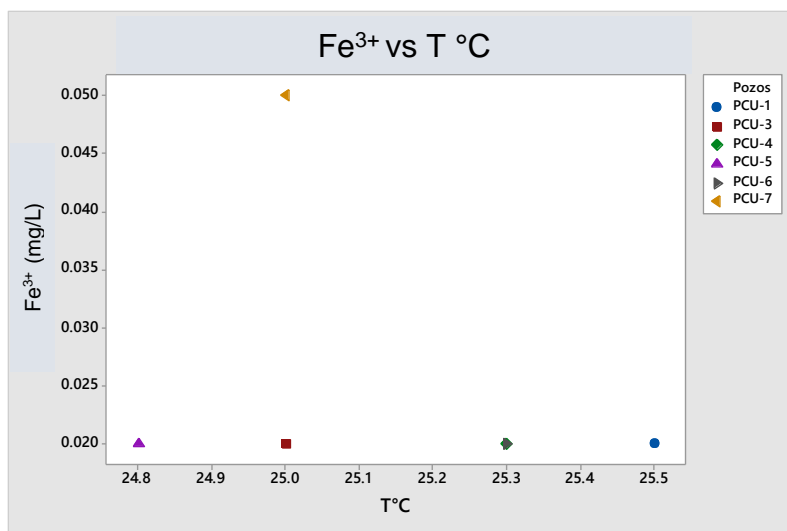


➤ **Mg²⁺**

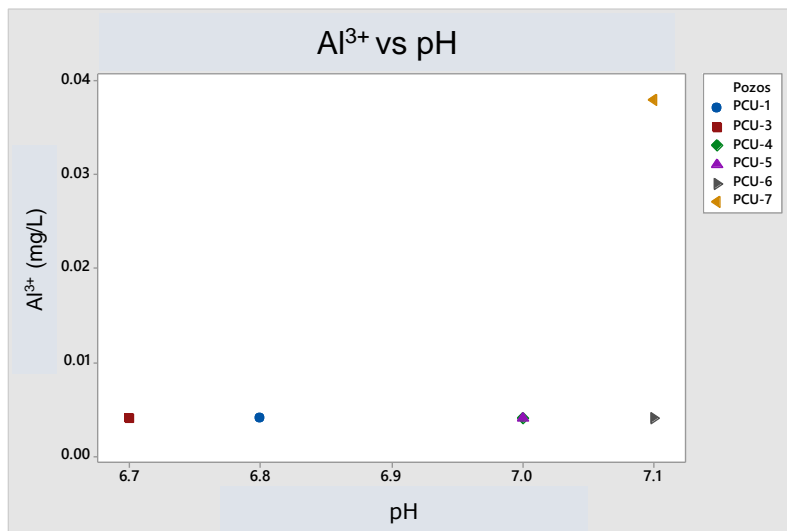
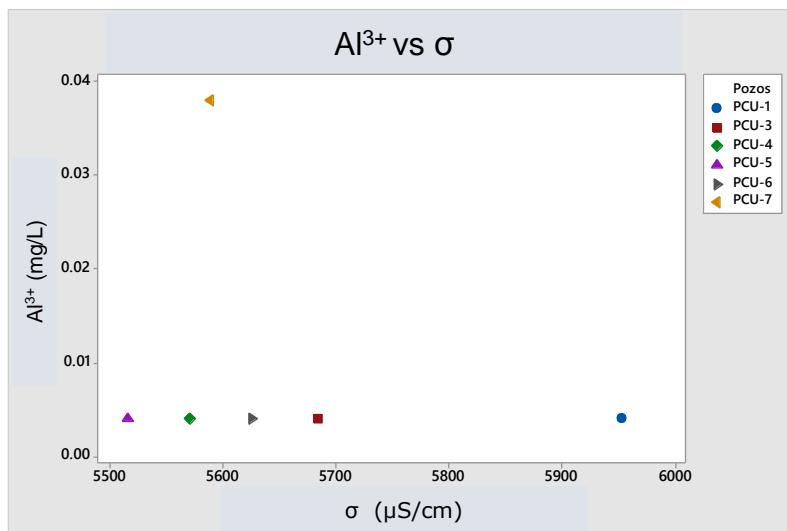
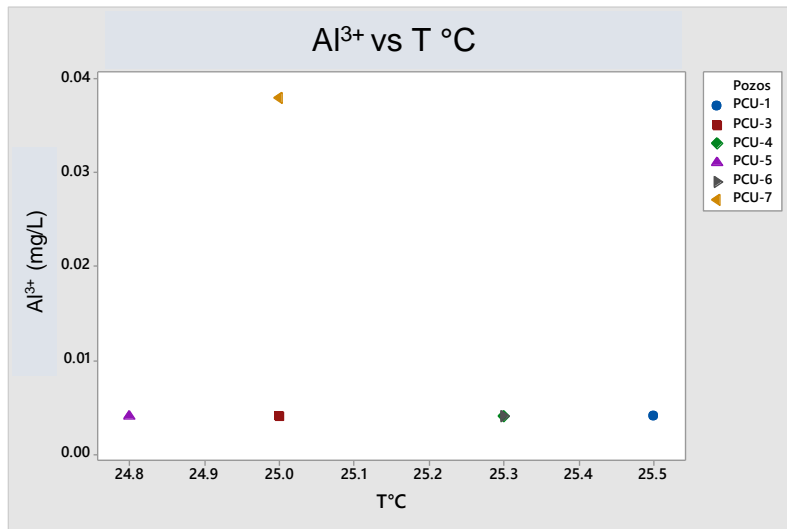


Parámetros fisicoquímicos vs iones sobresalientes analizados (muestreo 1)

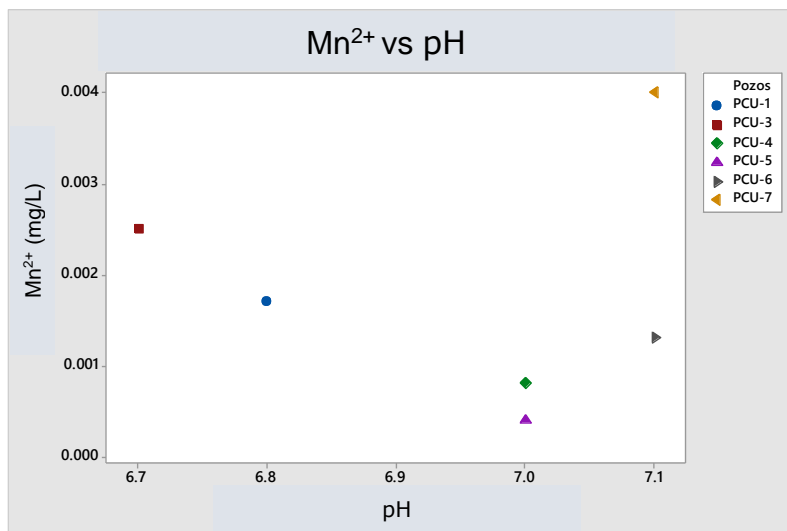
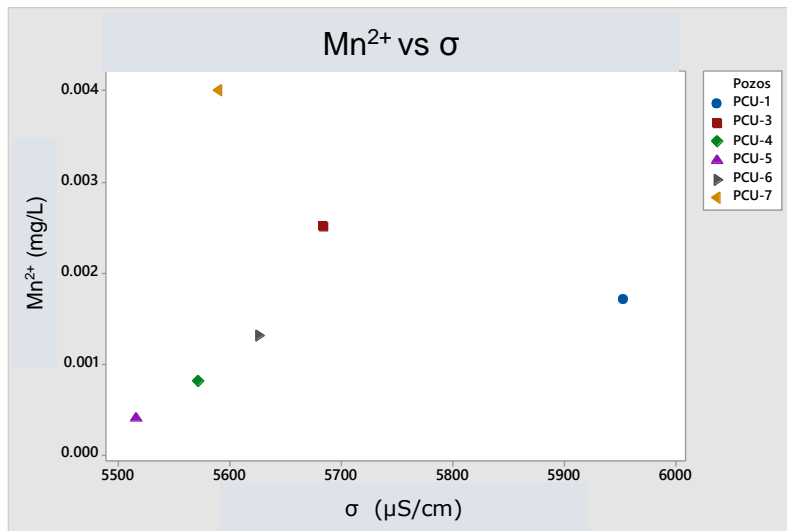
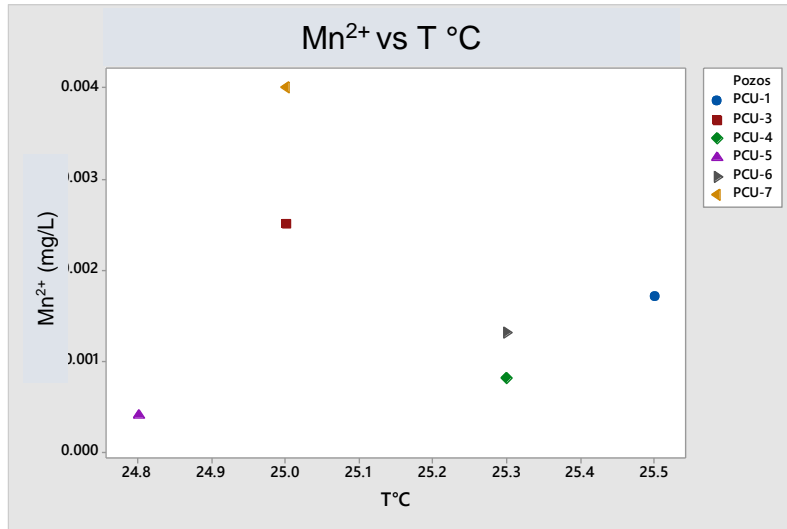
➤ Fe³⁺



➤ **Al³⁺**



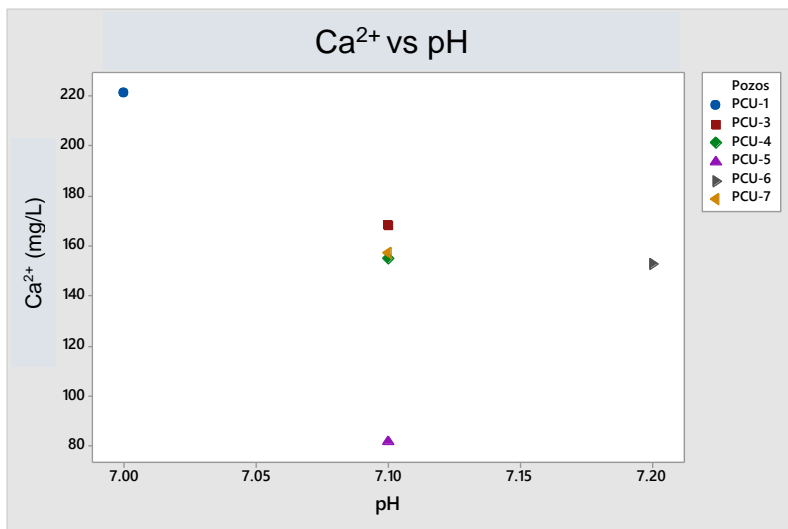
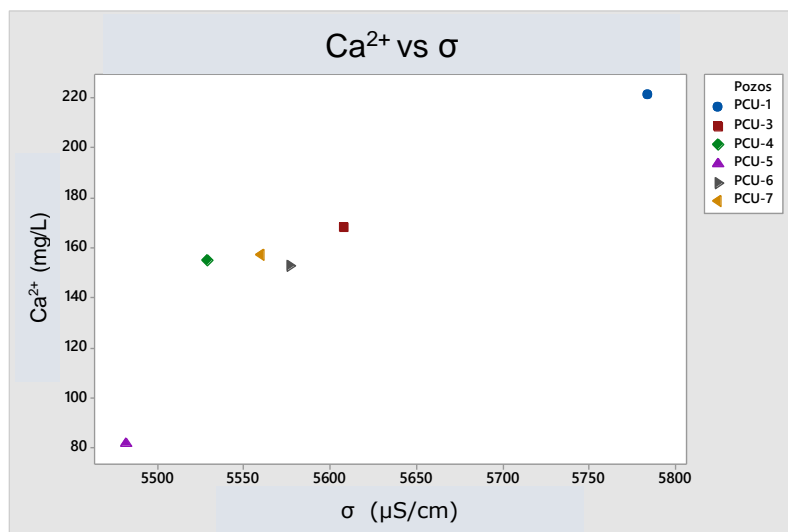
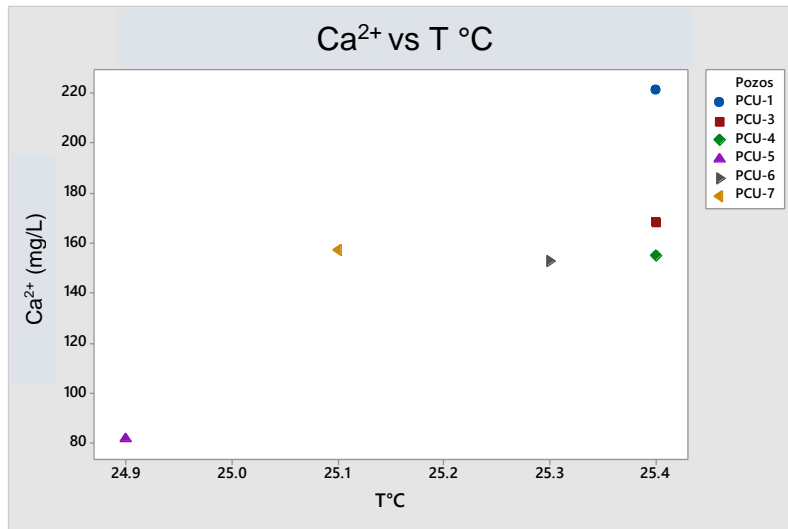
➤ **Mn²⁺**



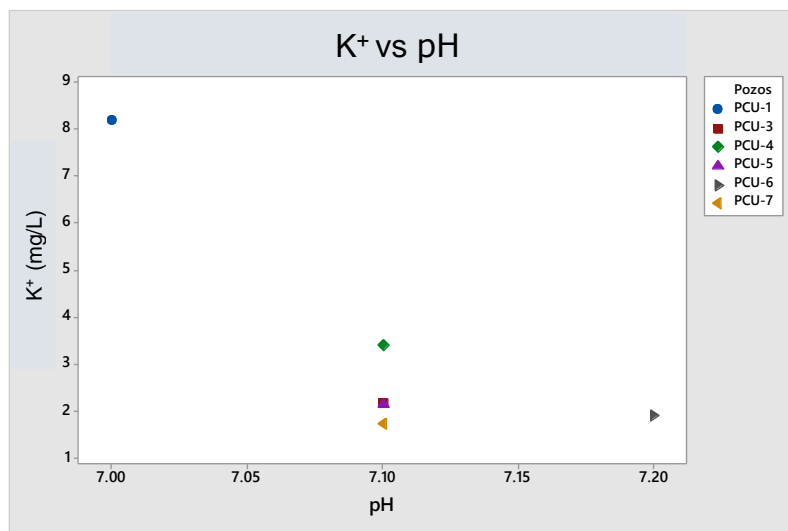
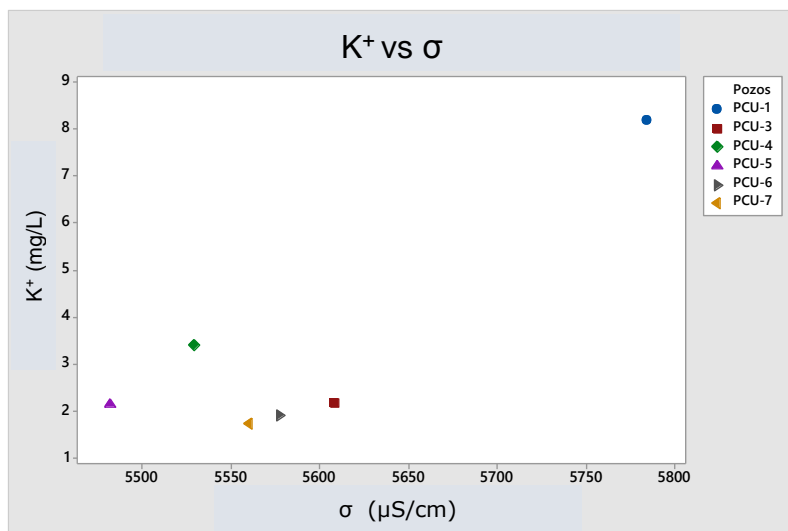
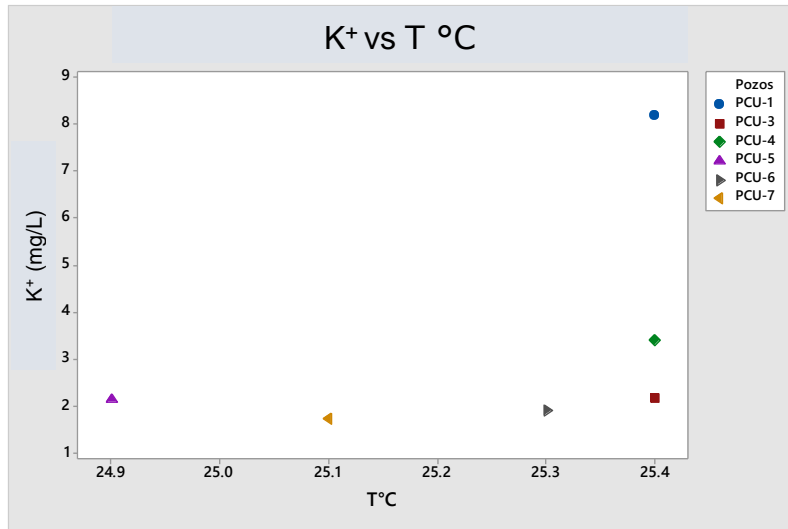
ANEXO B

Parámetros fisicoquímicos vs iones mayoritarios analizados (muestreo 2)

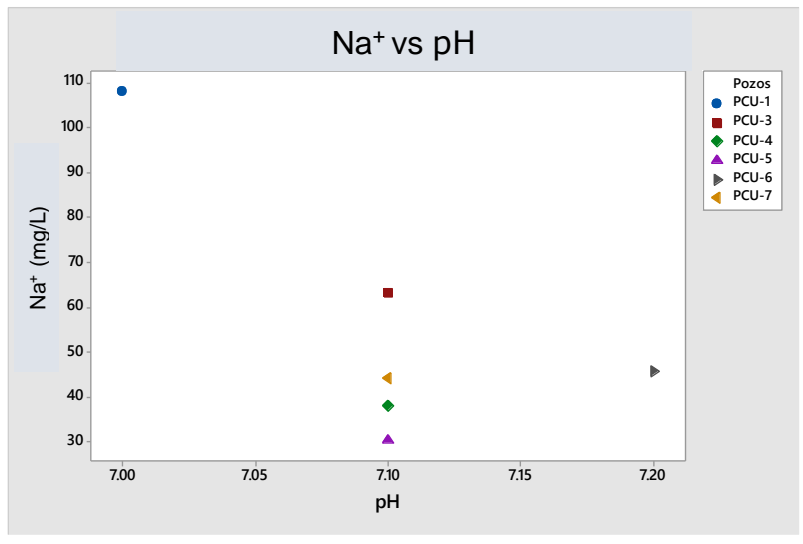
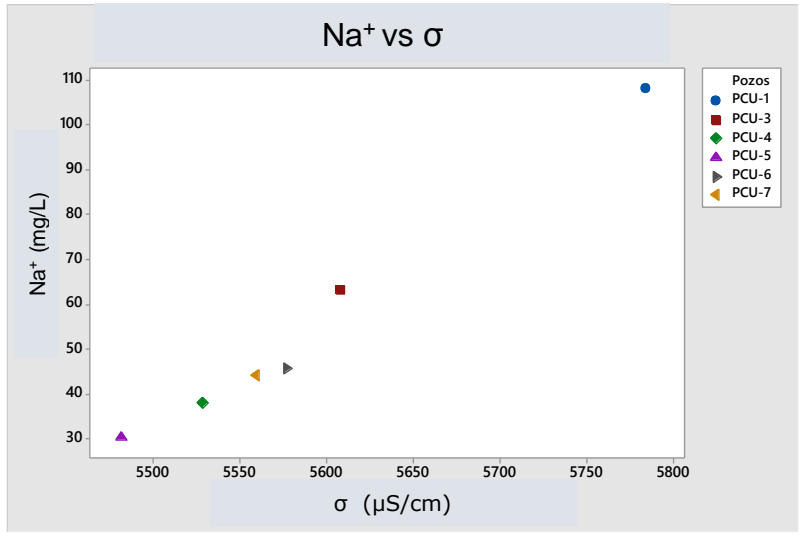
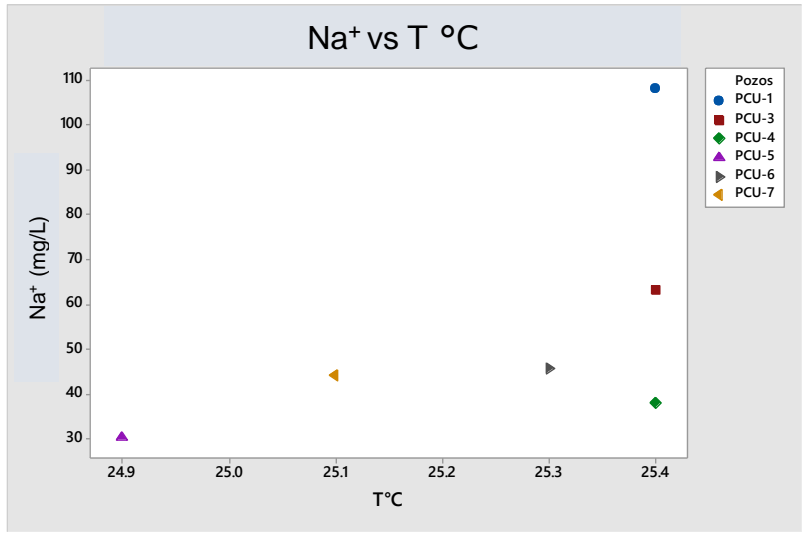
➤ Ca^{2+}



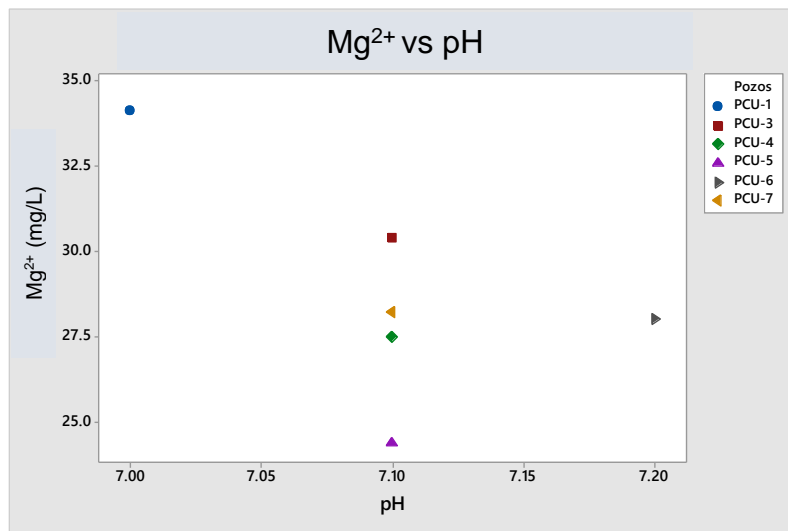
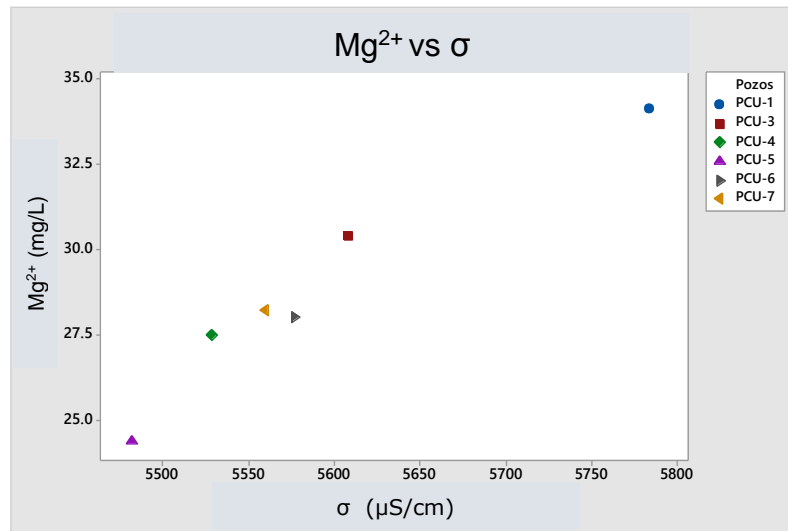
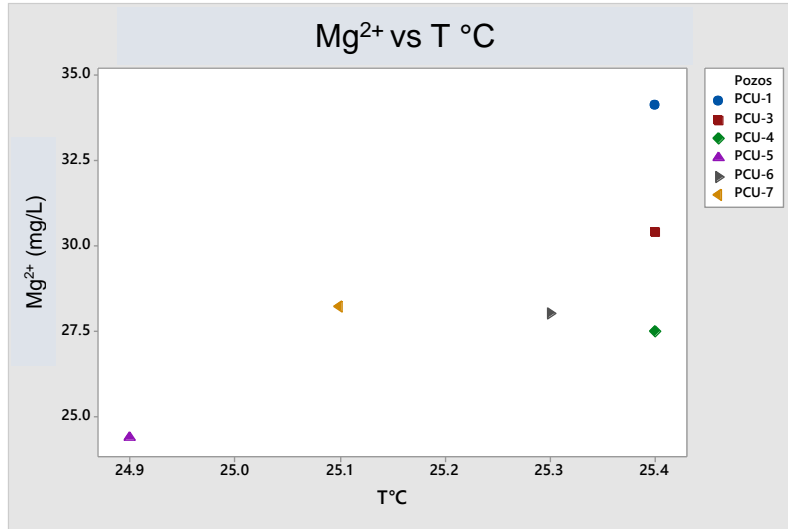
➤ K^+



➤ Na⁺

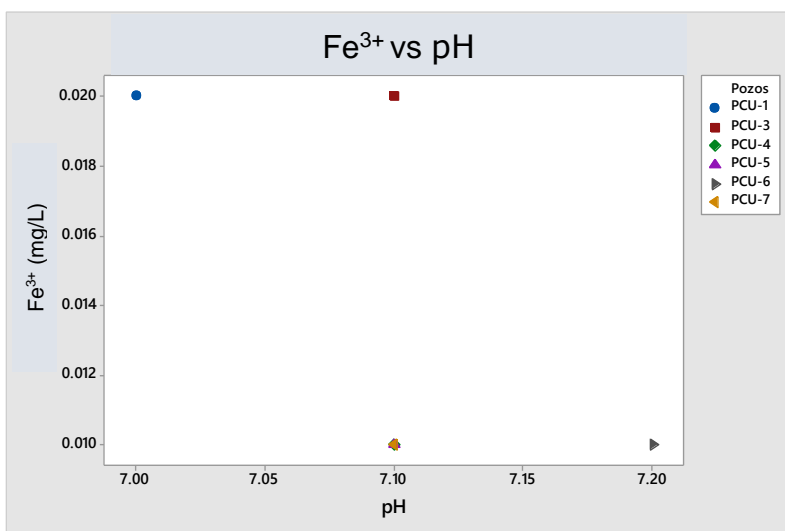
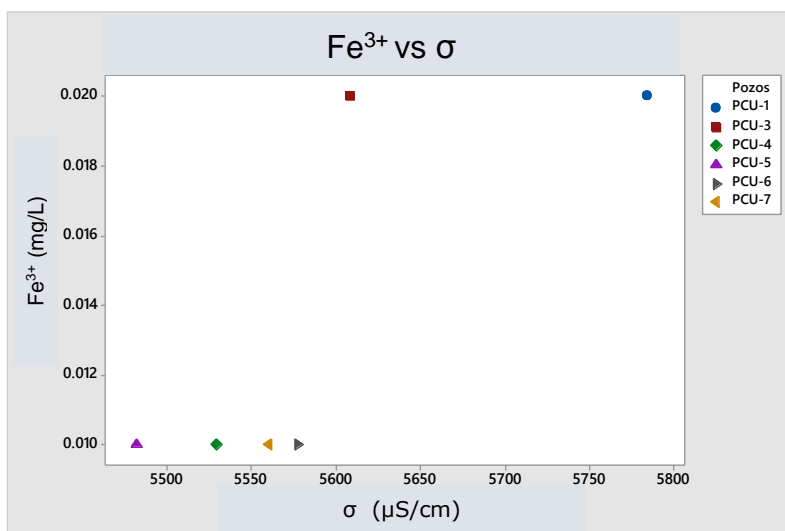
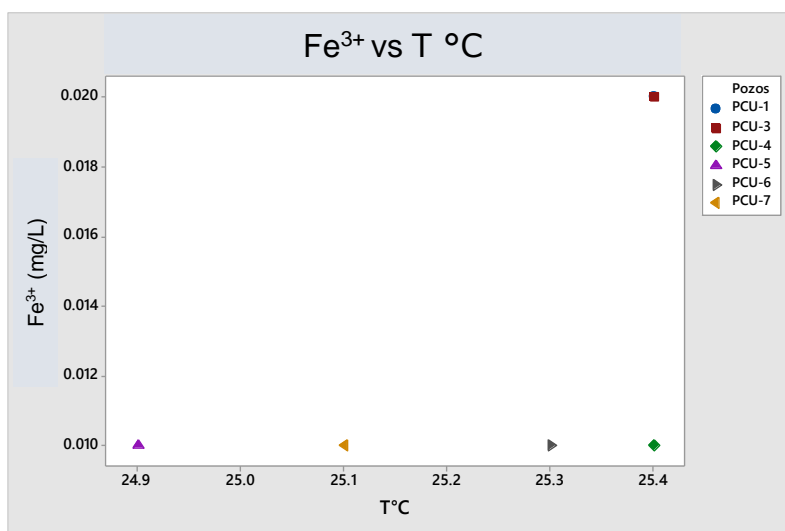


➤ **Mg²⁺**

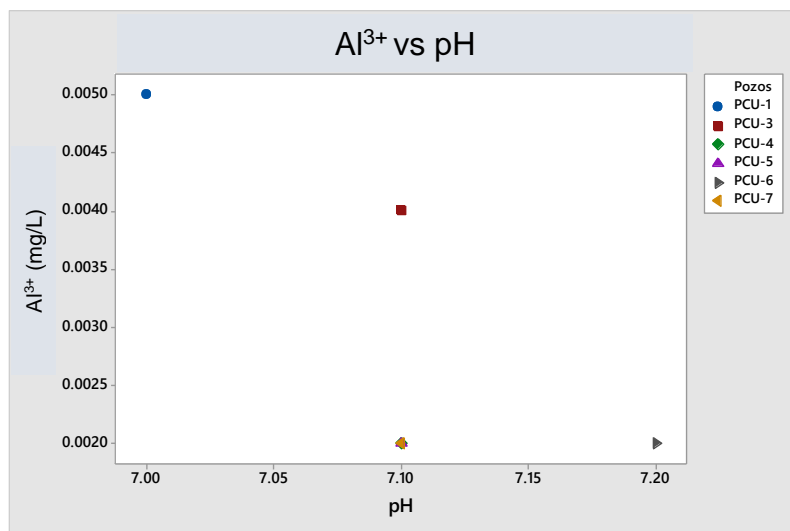
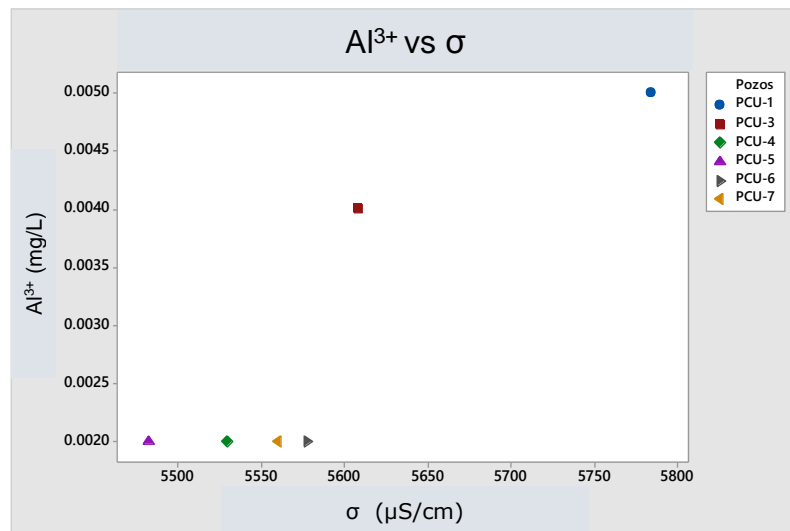
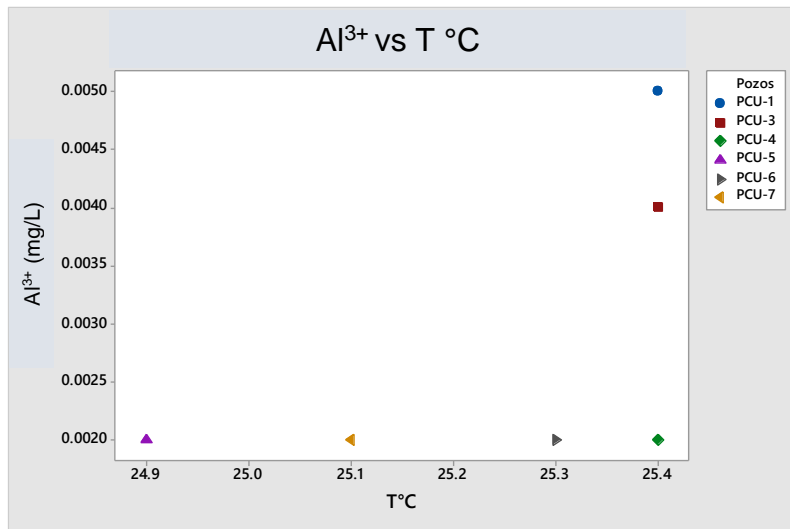


Parámetros fisicoquímicos vs iones sobresalientes analizados (muestreo 2)

➤ Fe³⁺

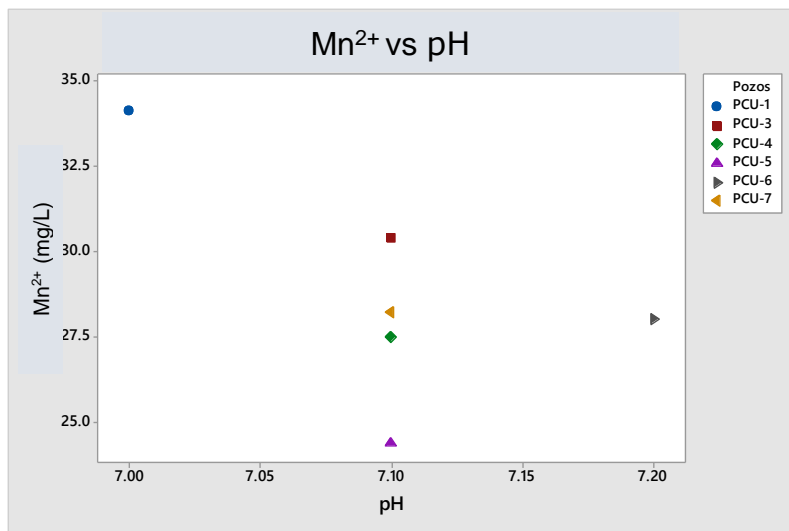
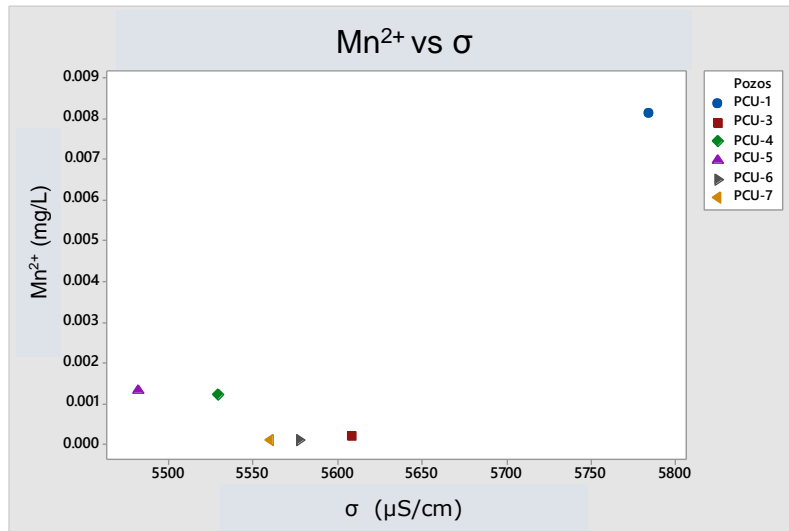
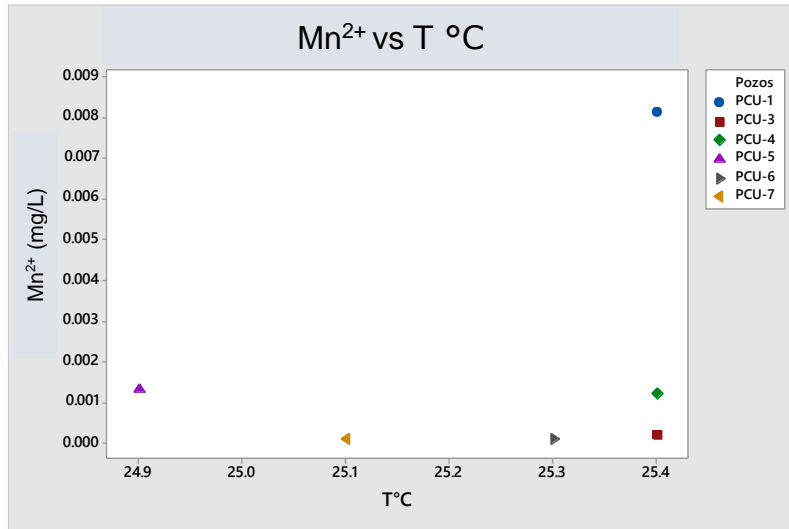


➤ **Al³⁺**





Mn²⁺



ANEXO B
Resultados de laboratorio

Quality Analysis ...



Innovative Technologies

Report No.: A21-01922-Revised
Report Date: 18-Feb-21
Date Submitted: 04-Feb-21
Your Reference: Evolución de contaminantes en aguas subterráneas

Universidad Autónoma de Nuevo León Av.
Universidad s/n, Cd. Universitaria,
San Nicolás de los Garza, N.L. México. CP. 66455

ATTN: Héctor de León Gómez

CERTIFICATE OF ANALYSIS

9 Water and Soil samples were submitted for analysis.

The following analytical package(s) were requested:		Testing Date:
6 MB	QOP HYDROGEO (Hydrogeochemistry ICPMS)	2021-02-05 13:03:28
6-Acidify samples	Acidify	
UT-1-0.5g	QOP Ultratrace-1 (Aqua Regia ICPMS)	2021-02-10 15:23:10

REPORT **A21-01922-Revised**

This report may be reproduced without our consent. If only selected portions of the report are reproduced, permission must be obtained. If no instructions were given at time of sample submittal regarding excess material, it will be discarded within 90 days of this report. Our liability is limited solely to the analytical cost of these analyses. Test results are representative only of material submitted for analysis.

Notes:

Assays are recommended for values above the upper limit. The Au from AR-MS is for information purposes, for accurate Au fire assay 1A2 should be requested.

Values which exceed the upper limit should be analysed by Code 6 ICPOES. Samples showing dilution factor had to be diluted for analysis due to high total dissolved solids content. This dilution is taken into account. Detection limits will be elevated on these samples by the dilution factor. Effective October 2013 our Hydro-MS package has been modified with changes to the upper limits of some elements.

CERTIFIED BY:

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the end, positioned above a solid horizontal line.

ACTIVATION LABORATORIES LTD.
41 Bittern Street, Ancaster, Ontario, Canada, L9G 4V5
TELEPHONE +905 648-9611 or +1.888.228.5227 FAX +1.905.648.9613
E-MAIL Ancaster@actlabs.com ACTLABS GROUP WEBSITE www.actlabs.com

Analyte Symbol	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Hg	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U	Ti	S	P	Li	Be	B	Na	Mg	Al	K
Unit Symbol	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	%	%	%	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%
Lower Limit	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.2	0.001	0.02	0.001	0.01	0.3	0.001	0.001	0.001	1	0.001	0.1	0.1	1	0.001	0.01	0.01	0.01
Method Code	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS
PCU-1	< 0.002	< 0.002	0.03	< 0.002	< 0.002	< 0.4	< 0.002	0.04	0.126	0.04	< 0.6	< 0.002	3.09										
PCU-3	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.4	< 0.002	0.04	0.109	0.06	< 0.6	< 0.002	2.83										
PCU-4	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.4	< 0.002	0.04	0.090	0.05	< 0.6	< 0.002	2.58										
PCU-5	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.4	< 0.002	0.04	0.098	0.04	< 0.6	< 0.002	2.41										
PCU-6	< 0.002	< 0.002	< 0.002	0.03	< 0.002	< 0.4	< 0.002	0.04	0.087	0.05	< 0.6	< 0.002	2.80										
PCU-7	0.03	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.4	< 0.002	0.24	0.105	0.21	< 0.6	< 0.002	2.61										
SCU-1														0.066	< 1	0.119	6.2	0.7	17	0.036	0.83	1.34	0.20
SCU-2														0.071	< 1	0.089	7.2	0.8	14	0.039	0.85	1.29	0.10
SCU-3														0.022	< 1	0.072	5.7	0.4	8	0.016	0.60	0.86	0.16

Analyte Symbol	Bi	Ca	Sc	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	In	Sn
Unit Symbol	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Lower Limit	0.02	0.01	0.1	1	1	1	0.01	0.1	0.1	0.2	0.1	0.02	0.1	0.1	0.1	0.5	0.01	0.1	0.1	0.01	0.002	0.02	0.05
Method Code	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS
PCU-1																							
PCU-3																							
PCU-4																							
PCU-5																							
PCU-6																							
PCU-7																							
SCU-1	1.63	12.3	2.7	337	166	1830	20.5	15.8	55.5	74.2	> 5000	4.71	0.4	15.8	10.2	201	8.51	5.6	6.1	5.37	0.759	0.06	7.43
SCU-2	2.04	12.5	2.4	323	152	1850	20.9	16.5	58.3	74.4	> 5000	3.22	0.3	13.2	5.9	222	9.59	10.4	6.6	5.58	1.07	0.08	8.71
SCU-3	0.56	21.6	1.5	45	47	525	3.20	4.9	13.7	31.9	872	1.27	< 0.1	6.9	8.9	317	6.89	0.7	2.7	1.95	0.341	0.02	3.37

Quality Analysis ...



Innovative Technologies

Report No.: A21-12701
Report Date: 20-Jul-21
Date Submitted: 06-Jul-21
Your Reference: Tesis Maestr en Ciencias

UNIV. AUTONOMA DE NUEVA LEON - Mexico
Carr. A Cerro Prieto km 8,
Exhacienda de Guadalupe
Nuevo Leon 67700 Mexico

ATTN: Dr. Hector de Leon Gomez

CERTIFICATE OF ANALYSIS

6 Water samples were submitted for analysis.

The following analytical package(s) were requested:		Testing Date:
6 MB	QOP HYDROGEO (Hydrogeochemistry ICPMS)	2021-07-12 11:00:19
6-Acidify samples	Acidify	
6-Filter samples	Filter	

REPORT A21-12701

This report may be reproduced without our consent. If only selected portions of the report are reproduced, permission must be obtained. If no instructions were given at time of sample submittal regarding excess material, it will be discarded within 90 days of this report. Our liability is limited solely to the analytical cost of these analyses. Test results are representative only of material submitted for analysis.

Notes:

Values which exceed the upper limit should be analysed by Code 6 ICPOES. Samples showing dilution factor had to be diluted for analysis due to high total dissolved solids content. This dilution is taken into account. Detection limits will be elevated on these samples by the dilution factor.



LabID: 266

ACTIVATION LABORATORIES LTD.
41 Bittern Street, Ancaster, Ontario, Canada, L9G 4V5
TELEPHONE +905 648-9611 or +1.888.228.5227 FAX +1.905.648.9613
E-MAIL Ancaster@actlabs.com ACTLABS GROUP WEBSITE www.actlabs.com

CERTIFIED BY:

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Emmanuel Esemé".

Emmanuel Esemé, Ph.D.
Quality Control Coordinator

Analyte Symbol	Na	Li	Be	Mg	Al	Si	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Rb
Unit Symbol	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L
Lower Limit	5	1	0.1	2	2	200	30	700	1	0.1	0.1	0.5	0.1	10	0.005	0.3	0.2	0.5	0.01	0.01	0.03	0.2	0.005
Method Code	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
PCU-1	108000	14	< 0.2	34100	5	10600	8180	221000	< 2	3.7	1.2	< 1	8.1	< 20	0.210	1.1	1.5	11.6	4.75	< 0.02	0.39	3.3	1.46
PCU-3	63200	9	< 0.2	30400	< 4	10300	2170	168000	< 2	< 0.2	1.7	< 1	< 0.2	< 20	0.090	0.8	1.5	7.8	6.25	< 0.02	0.42	2.2	1.60
PCU-4	38000	7	< 0.1	27500	< 2	9800	3390	155000	< 1	< 0.1	1.5	0.8	1.2	< 10	0.077	0.8	0.8	11.0	8.51	< 0.01	0.41	3.7	1.63
PCU-5	30300	7	< 0.1	24400	< 2	10400	2130	81700	< 1	0.2	0.9	1.1	1.3	< 10	0.090	0.5	0.5	< 0.5	13.3	< 0.01	0.34	2.7	1.48
PCU-6	45600	8	< 0.1	28000	< 2	10000	1900	153000	< 1	0.3	0.9	0.8	< 0.1	< 10	0.098	0.5	0.6	7.9	6.90	< 0.01	0.26	3.5	1.48
PCU-7	44100	8	< 0.1	28200	< 2	10000	1730	157000	< 1	0.4	1.7	0.8	< 0.1	< 10	0.105	0.5	1.7	13.2	8.85	< 0.01	0.48	3.8	1.92

Analyte Symbol	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	
Unit Symbol	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L
Lower Limit	0.04	0.003	0.01	0.005	0.1	0.2	0.01	0.001	0.1	0.01	0.1	0.001	0.1	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
Method Code	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	
PCU-1	1800	0.077	0.05	< 0.01	1.3	< 0.4	0.06	0.015	2.9	0.06	< 0.2	0.423	35.3	0.003	0.06	< 0.002	< 0.002	0.003	0.010	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	
PCU-3	1700	0.050	< 0.02	< 0.01	1.3	< 0.4	< 0.02	< 0.002	0.3	< 0.02	< 0.2	0.444	44.5	0.013	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	0.014	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	
PCU-4	1570	0.053	0.02	< 0.005	1.3	< 0.2	0.02	0.005	0.8	0.02	< 0.1	0.431	63.1	0.002	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.019	< 0.001	< 0.001	0.001	< 0.001	
PCU-5	1300	0.028	< 0.01	< 0.005	1.7	< 0.2	< 0.01	0.001	0.3	< 0.01	< 0.1	0.357	98.3	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.003	0.031	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	
PCU-6	1620	0.029	< 0.01	< 0.005	1.3	< 0.2	0.05	0.002	0.3	0.02	< 0.1	0.208	50.2	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.011	0.002	< 0.001	< 0.001	< 0.001	
PCU-7	1620	0.028	< 0.01	< 0.005	1.5	< 0.2	0.09	0.001	0.1	0.05	< 0.1	0.388	64.5	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.002	0.016	0.004	< 0.001	< 0.003	< 0.001	

Analyte Symbol	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Hg	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U
Unit Symbol	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L
Lower Limit	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.2	0.001	0.02	0.001	0.01	0.3	0.001	0.001
Method Code	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
PCU-1	< 0.002	0.003	0.007	< 0.002	0.003	< 0.4	< 0.002	0.59	0.109	0.84	< 0.6	< 0.002	2.93
PCU-3	< 0.002	< 0.002	< 0.005	< 0.002	0.004	< 0.4	< 0.002	0.28	0.065	0.88	< 0.6	< 0.002	2.75
PCU-4	< 0.001	0.003	< 0.001	0.002	< 0.001	< 0.2	< 0.001	0.06	0.057	0.35	< 0.3	< 0.001	2.51
PCU-5	< 0.001	0.002	< 0.001	0.001	0.002	< 0.2	< 0.001	0.04	0.040	0.18	< 0.3	< 0.001	2.11
PCU-6	< 0.001	0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.2	< 0.001	0.03	0.044	0.39	< 0.3	< 0.001	2.54
PCU-7	< 0.001	0.002	0.003	< 0.001	0.003	< 0.2	< 0.001	0.03	0.061	0.47	< 0.3	< 0.001	2.62



Report No.: A21-12702
 Report Date: 22-Jul-21
 Date Submitted: 06-Jul-21
 Your Reference: Tesis Maestr en Ciencias

UNIV. AUTONOMA DE NUEVA LEON - Mexico
 Carr. A Cerro Prieto km 8,
 Exhacienda de Guadalupe
 Nuevo Leon 67700 Mexico

ATTN: Dr. Hector de Leon Gomez

CERTIFICATE OF ANALYSIS

3 Pulp samples were submitted for analysis.

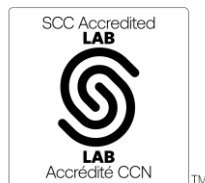
The following analytical package(s) were requested:		Testing Date:
UT-1-0.5g	QOP Ultratrace-1 (Aqua Regia ICPMS)	2021-07-15 14:39:13

REPORT A21-12702

This report may be reproduced without our consent. If only selected portions of the report are reproduced, permission must be obtained. If no instructions were given at time of sample submittal regarding excess material, it will be discarded within 90 days of this report. Our liability is limited solely to the analytical cost of these analyses. Test results are representative only of material submitted for analysis.

Notes:

Assays are recommended for values above the upper limit. The Au from AR-MS is for information purposes, for accurate Au fire assay 1A2 should be requested.



LabID: 266

ACTIVATION LABORATORIES LTD.
 41 Bittern Street, Ancaster, Ontario, Canada, L9G 4V5
 TELEPHONE +905 648-9611 or +1.888.228.5227 FAX +1.905.648.9613
 E-MAIL Ancaster@actlabs.com ACTLABS GROUP WEBSITE www.actlabs.com

CERTIFIED BY:

Emmanuel Esemé, Ph.D.
 Quality Control Coordinator

Analyte Symbol	Ti	S	P	Li	Be	B	Na	Mg	Al	K	Bi	Ca	Sc	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge
Unit Symbol	%	%	%	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Lower Limit	0.001	1	0.001	0.1	0.1	1	0.001	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.1	1	1	1	0.01	0.1	0.1	0.2	0.1	0.02	0.1
Method Code	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS
SCU-1	0.062	< 1	0.084	6.1	0.7	20	0.041	0.74	1.15	0.19	1.71	9.37	1.9	311	139	1630	19.4	14.1	54.5	74.6	> 5000	< 0.02	< 0.1
SCU-2	0.056	< 1	0.084	6.4	0.8	23	0.030	0.60	1.19	0.19	1.80	9.61	2.0	277	107	1310	17.5	14.2	51.5	61.0	4890	< 0.02	< 0.1
SCU-3	0.016	< 1	0.092	6.0	0.7	12	0.021	0.47	0.72	0.13	0.60	15.0	0.6	59	52	656	4.07	4.4	14.0	28.4	1110	< 0.02	< 0.1

Analyte Symbol	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	In	Sn	Sb	Te	Cs	Ba	La	Ce	Cd	Pr	Nd	Sm	Se	Eu	Gd
Unit Symbol	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Lower Limit	0.1	0.1	0.5	0.01	0.1	0.1	0.01	0.002	0.02	0.05	0.02	0.02	0.02	0.5	0.5	0.01	0.01	0.1	0.02	0.1	0.1	0.1	0.1
Method Code	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS
SCU-1	14.6	8.5	189	7.36	6.7	2.5	5.62	0.898	0.05	7.29	4.74	0.13	0.86	342	15.9	22.3	4.14	2.4	8.96	1.4	1.3	0.2	1.5
SCU-2	13.2	10.1	183	8.01	3.1	2.2	4.59	0.768	0.05	7.65	4.89	0.10	1.00	346	18.9	25.6	3.72	2.8	9.80	1.9	1.1	0.3	1.7
SCU-3	4.6	5.0	310	5.69	1.0	1.0	2.05	0.341	< 0.02	3.71	1.90	0.05	0.42	200	12.6	18.1	1.92	1.9	7.18	1.3	1.0	0.2	1.4

Analyte Symbol	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Au	Tl	Pb	Th	U	Hg
Unit Symbol	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppb	ppm	ppm	ppm	ppm	ppb
Lower Limit	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.1	0.001	0.5	0.02	0.1	0.1	0.1	10
Method Code	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS
SCU-1	0.2	1.2	0.2	0.7	< 0.1	0.6	< 0.1	< 0.1	< 0.05	2.9	0.002	3.6	0.13	264	2.3	0.9	510
SCU-2	0.2	1.4	0.3	0.8	< 0.1	0.7	< 0.1	< 0.1	< 0.05	2.2	0.001	53.1	0.15	239	2.1	0.8	380
SCU-3	0.2	1.0	0.2	0.5	< 0.1	0.4	< 0.1	< 0.1	< 0.05	0.9	0.001	3.1	0.09	129	0.4	0.5	80

Analyte Symbol	Ti	S	P	Li	Be	B	Na	Mg	Al	K	Bi	Ca	Sc	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge
Unit Symbol	%	%	%	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Lower Limit	0.001	1	0.001	0.1	0.1	1	0.001	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.1	1	1	1	0.01	0.1	0.1	0.2	0.1	0.02	0.1
Method Code	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS
OREAS 45d (Aqua Regia) Meas		< 1	0.034	16.7			0.039	0.16	5.65	0.10	0.26	0.09	42.8	168	435	403	13.5	25.8	193	340	40.0	17.5	
OREAS 45d (Aqua Regia) Cert		0.045	0.035	11.9			0.031	0.144	4.860	0.097	0.30	0.09	41.50	201.0	467	400.000	13.650	26.2	176.0	345.0	30.6	17.9	
OREAS 922 (AQUA REGIA) Meas		< 1	0.065	22.2	0.6		0.021	1.28	2.76	0.40	9.93	0.40	3.8	30	44	754	5.16	18.5	33.2	2080	257	7.74	< 0.1
OREAS 922 (AQUA REGIA) Cert		0.386	0.063	22.8	0.65		0.021	1.33	2.72	0.376	10.3	0.324	3.15	29.4	40.7	730	5.05	19.4	34.3	2176	256	7.62	0.10
OREAS 923 (AQUA REGIA) Meas		< 1	0.062	23.9	0.7			1.44	3.16	0.39	20.0	0.41	3.6	31	46	893	6.02	21.5	33.0	4120	354	7.74	
OREAS 923 (AQUA REGIA) Cert		0.684	0.061	23.4	0.61			1.43	2.80	0.322	21.8	0.326	3.09	30.6	39.4	850	5.91	22.2	32.7	4248	335	8.01	
OREAS 923 (AQUA REGIA) Meas		< 1	0.065	25.6	0.6			1.46	2.89	0.36	20.0	0.41	3.7	31	43	894	6.22	21.9	31.9	4280	358	8.24	
OREAS 923 (AQUA REGIA) Cert		0.684	0.061	23.4	0.61			1.43	2.80	0.322	21.8	0.326	3.09	30.6	39.4	850	5.91	22.2	32.7	4248	335	8.01	
OREAS 907 (Aqua Regia) Meas	0.022	< 1	0.021	4.9	0.9		0.085	0.23	1.18	0.32	22.6	0.27	2.3	5	9	320	8.40	43.5	4.8	6220	149	14.8	
OREAS 907 (Aqua Regia) Cert	0.0170	0.0660	0.0240	4.05	0.870		0.0860	0.221	0.945	0.286	22.3	0.280	2.16	5.12	8.59	330	8.18	43.7	4.74	6370	139	14.7	
OREAS 263 (Aqua Regia) Meas		< 1	0.044	20.9	1.3		0.081	0.62	1.96	0.35	0.58	1.07	3.8	27	57	500	3.64	31.5	71.3	92.8	130	3.63	
OREAS 263 (Aqua Regia) Cert		0.126	0.0410	20.1	1.22		0.0790	0.593	1.29	0.288	0.570	1.03	3.52	22.8	48.0	490	3.68	31.0	72.0	87.0	127	4.92	
OREAS 130 (Aqua Regia) Meas	0.030	6	0.093	32.7				0.95	1.25	0.51	3.26	1.74	3.5	36	25	1690	7.41	27.8	34.8	232	> 5000	5.38	
OREAS 130 (Aqua Regia) Cert	0.0270	6.02	0.0860	29.9				0.892	1.10	0.500	3.05	1.81	3.42	33.1	23.2	1630	7.27	27.1	35.2	226	16900	4.78	
OREAS 153b (Aqua Regia) Meas	0.050	1	0.050	4.1	0.1		0.159	1.49	2.71	0.34	1.70	1.29	10.0	150	17	252	3.66	15.4	11.4	6460	123	8.31	
OREAS 153b (Aqua Regia) Cert	0.0500	1.27	0.0470	3.28	0.180		0.148	1.47	2.28	0.365	1.81	1.32	9.98	153	16.2	240	3.60	14.9	11.1	6700	118	8.06	
Method Blank	< 0.001	< 1	< 0.001	< 0.1	< 0.1	6	0.013	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.02	< 0.01	0.1	< 1	1	< 1	< 0.01	< 0.1	0.1	< 0.2	1.4	0.05	< 0.1
Method Blank	< 0.001	< 1	< 0.001	< 0.1	< 0.1	6	0.009	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.02	< 0.01	< 0.1	< 1	2	< 1	< 0.01	< 0.1	0.1	< 0.2	0.5	0.09	< 0.1

Analyte Symbol	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	In	Sn	Sb	Te	Cs	Ba	La	Ce	Cd	Pr	Nd	Sm	Se	Eu	Gd
Unit Symbol	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Lower Limit	0.1	0.1	0.5	0.01	0.1	0.1	0.01	0.002	0.02	0.05	0.02	0.02	0.02	0.5	0.5	0.01	0.01	0.1	0.02	0.1	0.1	0.1	0.1
Method Code	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS
OREAS 45d (Aqua Regia) Meas	4.3	21.4	13.2	4.42					0.08	1.85				88.8	10.8	24.1							
OREAS 45d (Aqua Regia) Cert	6.50	20.9	11.0	5.08					0.085	1.950				80	9.960	24.8							
OREAS 922 (AQUA REGIA) Meas	7.0	24.4	15.4	19.0	9.0	1.1	0.68	1.29	0.24	3.92	0.73		1.84	45.5	35.3	65.1	0.25	7.7	31.5	5.5	3.1		5.2
OREAS 922 (AQUA REGIA) Cert	6.12	22.7	15.0	16.0	22.3	0.35	0.69	0.851	0.24	3.83	0.57		1.76	70	32.5	63	0.28	7.33	27.5	4.98	3.44		4.44
OREAS 923 (AQUA REGIA) Meas	7.6	23.9	14.6	18.4	14.7		0.99	1.46	0.48	6.34	0.38		1.60	71.6	34.8	64.3	0.38	7.5	29.4	5.5	5.5		5.1
OREAS 923 (AQUA REGIA) Cert	7.07	19.6	13.6	14.3	22.5		0.84	1.62	0.45	5.99	0.58		1.56	54	30.0	60	0.40	6.79	25.4	4.34	5.99		4.07
OREAS 923 (AQUA REGIA) Meas	7.3	22.5	14.9	18.2	29.6		0.94	1.61	0.45	6.41	0.75		1.65	53.2	34.9	63.4	0.42	7.4	29.2	5.1	4.9		4.9
OREAS 923 (AQUA REGIA) Cert	7.07	19.6	13.6	14.3	22.5		0.84	1.62	0.45	5.99	0.58		1.56	54	30.0	60	0.40	6.79	25.4	4.34	5.99		4.07
OREAS 907 (Aqua Regia) Meas	38.7	20.4	13.6	7.35	6.2		5.46	1.30	2.46	2.45	2.08	0.24	1.39	261	37.1	68.4	0.53	7.7	29.9	5.3	8.8	1.0	4.2
OREAS 907 (Aqua Regia) Cert	37.0	16.7	11.7	6.52	43.7		5.64	1.30	2.35	2.34	2.28	0.230	1.17	225	36.1	73.0	0.540	7.36	27.8	4.79	9.05	0.950	3.45
OREAS 263 (Aqua Regia) Meas	32.1		18.3	11.6			0.59	0.286	0.03		9.31	0.21		197			0.28			5.0		0.8	4.3
OREAS 263 (Aqua Regia) Cert	30.8		16.9	12.0			0.570	0.285	0.0290		7.37	0.210		175			0.270			4.41		0.850	3.89
OREAS 130 (Aqua Regia) Meas	215	44.3	20.3	13.1	31.0		8.38	6.18	0.20		4.92	0.19	3.20		24.2	48.9	28.2	5.7					3.9
OREAS 130 (Aqua Regia) Cert	205	41.6	23.2	13.0	19.0		8.25	6.27	0.200		4.69	0.170	2.96		26.4	54.0	28.8	5.93					3.53
OREAS 153b (Aqua Regia) Meas	84.1	7.0	37.6	9.06	0.8		150	1.46	0.24	2.85	1.37	0.20	0.20	16.1	4.0	9.38	0.29		6.28	1.6	10.4		
OREAS 153b (Aqua Regia) Cert	80.0	7.34	31.4	9.38	0.860		156	1.40	0.210	3.27	2.12	0.250	0.260	22.8	3.79	9.11	0.240		6.31	1.71	10.5		
Method Blank	< 0.1	< 0.1	0.7	< 0.01	< 0.1	< 0.1	0.12	< 0.002	< 0.02	< 0.05	0.08	< 0.02	< 0.02	7.7	< 0.5	0.01	0.07	< 0.1	< 0.02	< 0.1	0.3	< 0.1	< 0.1
Method Blank	0.4	< 0.1	< 0.5	< 0.01	< 0.1	< 0.1	0.02	< 0.002	< 0.02	< 0.05	< 0.02	< 0.02	< 0.02	4.5	< 0.5	0.01	0.02	< 0.1	< 0.02	< 0.1	1.1	< 0.1	< 0.1

Analyte Symbol	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Au	Tl	Pb	Th	U	Hg
Unit Symbol	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppb	ppm	ppm	ppm	ppm	ppb
Lower Limit	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.1	0.001	0.5	0.02	0.1	0.1	0.1	10
Method Code	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS
OREAS 45d (Aqua Regia) Meas												18.2		18.7	11.1	1.5	
OREAS 45d (Aqua Regia) Cert												21		17.00	11.3	1.64	
OREAS 922 (AQUA REGIA) Meas	0.7							0.1		1.1			0.17	61.6	15.1	2.1	
OREAS 922 (AQUA REGIA) Cert	0.62							0.61		1.12			0.14	60	14.5	1.98	
OREAS 923 (AQUA REGIA) Meas	0.7							0.4		2.1			0.17	84.4	15.9	2.2	
OREAS 923 (AQUA REGIA) Cert	0.54							0.60		1.96			0.12	81	14.3	1.80	
OREAS 923 (AQUA REGIA) Meas	0.7							0.6		1.7			0.16	84.3	15.7	2.2	
OREAS 923 (AQUA REGIA) Cert	0.54							0.60		1.96			0.12	81	14.3	1.80	
OREAS 907 (Aqua Regia) Meas	0.5	1.8	0.2	0.5	< 0.1	0.3	< 0.1	0.1		1.5		103	0.14	36.3	9.0	2.2	
OREAS 907 (Aqua Regia) Cert	0.430	1.63	0.210	0.430	0.0490	0.290	0.0390	1.09		0.980		101	0.120	34.1	8.04	2.15	
OREAS 263 (Aqua Regia) Meas	0.5	2.7	0.5	1.3		1.0							0.54	36.4	11.7	1.3	190
OREAS 263 (Aqua Regia) Cert	0.500	2.64	0.430	1.29		0.990							0.530	34.0	10.6	1.28	170
OREAS 130 (Aqua Regia) Meas			0.5				0.2	0.9		1.7			5.34	1220	9.9	8.3	680
OREAS 130 (Aqua Regia) Cert			0.480				0.150	0.610		1.40			5.92	1300	10.3	8.36	670
OREAS 153b (Aqua Regia) Meas	0.3	1.7			0.1	0.8	0.1				0.186	314	0.07	13.3	0.4	< 0.1	60
OREAS 153b (Aqua Regia) Cert	0.310	1.92			0.130	0.83	0.110				0.170	320	0.0640	12.4	0.350	0.0610	66.0
Method Blank	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.05	0.1	< 0.001	1.8	< 0.02	< 0.1	< 0.1	< 0.1	70
Method Blank	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.05	< 0.1	< 0.001	0.9	< 0.02	0.1	< 0.1	< 0.1	20