



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



**COORDINACIÓN DE DESARROLLO
PROFESIONAL E INSTITUCIONAL
SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO**

T E S I S

**EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA
DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DE LOS
SISTEMAS DE FLUJO SUBTERRÁNEO: OBRAJUELO-
QUERÉTARO.**

que para obtener el grado de
**Maestro en
Ciencias y Tecnología del Agua**

presenta
Jesús Arturo Rabadán Ramírez

Tutor: Dr. Manuel Martínez Morales

Jiutepec, Morelos

2019



2019
AÑO DEL CASQUILLO DEL SUR
EMILIANO ZAPATA



Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada “EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE FLUJO SUBTERRÁNEO: OBRAJUELO-QUERÉTARO”, otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

Jesús Arturo Rabadán Ramírez

Jiutepec, Morelos a 17 de diciembre del 2019



DEDICATORIA

Dedico esta tesis de investigación a mis padres Rosalía Ramírez Lagunas y Crescencio Rabadán Delgado por todo el apoyo incondicional en todos los aspectos de mí vida y haber aportado parte de sus enseñanzas para hacerme de una persona de la que soy actualmente.

A mis hermanas y demás familia en general por el apoyo motivacional que me brindaron y me siguen motivando día con día en todo el transcurso de mí vida.

A todas las personas, tutor, comité, profesores y amigos que durante este proceso de investigación aportaron sus conocimientos, experiencias, comentarios y observaciones que hicieron posible este trabajo.

Jesús Arturo Rabadán Ramírez

AGRADECIMIENTOS

Doy infinitamente gracias a la divinidad por haber dado la oportunidad de tener esta experiencia de realizar una maestría y por toda la ayuda y el inmenso apoyo que me ha brindado durante toda mi vida.

Agradezco al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y a la subcoordinación del posgrado, por haberme aceptado y ser parte de esta gran Institución y darme la oportunidad de desarrollar una metodología de investigación al beneficio para la sociedad.

Le agradezco al Dr. Manuel Martínez Morales, en primera por haberme aceptado como su alumno para desarrollar el tema de investigación y en segunda, por haberme dado toda la atención y darme una enseñanza tanto para la vida profesional como personal.

Agradezco a mi comité tutorial a la Dra. Sofía E. Garrido Hoyos, Dra. Edith Rosalba Salcedo Sánchez, Dra. María del Pilar Saldaña Fabela y al M.I. Carlos Gutiérrez Ojeda, por todo el apoyo brindado a lo largo de este trabajo.

Gracias a todos.

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

Isaac Newton

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE TABLAS	14
RESUMEN	15
CAPITULO I	16
1. INTRODUCCIÓN	16
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.2 ANTECEDENTES	20
1.2.1 Cantidad del agua subterránea	20
1.2.2 Calidad del agua subterránea	23
1.2.3 Caracterización Hidrogeoquímica	25
1.2.3.1 Facies del agua subterránea	25
1.2.4 Hidrogeología	26
1.2.5 Isotopía.....	29
1.3 JUSTIFICACIÓN	31
1.4 HIPÓTESIS	32
1.5 OBJETIVOS.....	33
1.5.1 Objetivo general	33
1.5.2 Objetivos específicos	33
CAPITULO II	34
2. MARCO TEÓRICO	34
2.1 HIDROLOGÍA.....	34
2.1.1 Ciclo hidrológico	34
2.2 HIDROGEOLOGÍA	34
2.2.1 Tipos de acuíferos	35
2.3 HIDRODINÁMICA	37
2.3.1 Nivel del agua subterránea	37
2.3.2 Sistemas de flujo	38
2.4 HIDROGEOQUÍMICA.....	41
2.4.1 Características físico-químicas del agua subterránea.	41
a) Temperatura.....	41
b) Potencial de hidrógeno (pH).....	42
c) Potencial redox (Eh)	42
d) Conductividad eléctrica (CE).....	43
e) Oxígeno disuelto (OD).....	43
f) Sólidos disueltos totales (SDT)	44
2.4.2 Composición química del agua subterránea	44
2.4.3 Relaciones iónicas	49
2.4.4 Procesos hidrogeoquímicos que determinar la composición del agua subterránea.	50
a) Disolución- precipitación	50
b) Procesos de óxido-reducción	52
c) Sorción-Desorción	53
2.4.5 Modelación hidrogeoquímica	54
2.4.5.1 Índice de saturación.....	55
2.5 MODELO HIDROGEOLOGICO	56
2.5.1 Modelo hidrogeológico conceptual.....	56
2.5.2 Modelo hidrogeológico matemático	57
2.5.3 Aplicación de los Modelos hidrogeológicos	57
CAPITULO III	58

3. MÉTODOS Y MATERIALES	58
3.1 DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	59
3.2 MEDICIÓN DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO.....	60
3.3 MUESTREO	63
3.4 INTEGRACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.	67
3.5 ANÁLISIS DE DATOS	67
3.5.1 Balance iónico	67
3.5.2 Análisis de datos hidrogeoquímicos.....	68
3.5.3 Análisis estadístico descriptivo y multivariado	69
3.5.4 Análisis de la calidad del agua	70
3.6 EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA	73
CAPITULO IV.	74
4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	74
4.1 MARCO GEOGRÁFICO.....	74
4.1.1 Localización y Extensión del Área.....	74
4.1.2 Clima	75
4.1.2.1 Temperatura	76
4.1.2.2 Precipitación	77
4.1.3 Uso de suelo y vegetación	78
4.1.4 Zonas Agrícolas.....	79
4.1.5 Zonas industriales	80
4.2 MARCO FISIAGRÁFICO.....	81
4.2.1 Geomorfología.....	83
4.3 MARCO HIDROLÓGICO	85
4.3.1 Hidrología superficial.....	85
4.3.1.1 Región hidrológica- administrativa: VIII. Lerma- Santiago-Pacífico.....	85
4.3.1.2 Región Hidrológica: No. 12, Lerma-Santiago.....	85
4.3.1.3 Cuenca Río la Laja	86
4.3.1.4 Subcuenca Río Apaseo	86
4.3.2 Hidrología subterránea.....	88
4.4 MARCO GEOLÓGICO.....	91
4.4.1 Estratigrafía	91
4.4.2 Geología Estructural.....	99
4.4.2.1 Sistema de fallas de Querétaro	100
4.4.2.2 Sistema de Fallas NE-SW	102
CAPITULO V.	104
5. RESULTADOS.....	104
5.1 ANÁLISIS PIEZOMÉTRICO	104
5.1.1 Profundidad del nivel estático y dirección del flujo.....	104
5.1.1.1 Profundidad del nivel del agua subterránea	105
5.1.1.2 Dirección de flujos subterráneos	106
5.2 RESULTADOS Y UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS DE AGUA.....	107
5.3 HIDROGEOQUÍMICA.....	111
5.3.1 Balance iónico (cálculo del error)	111
5.3.2 Familias de agua	112
5.3.2.1 Familia Bicarbonatada sódica	113
5.3.2.2 Familia Bicarbonatada Cálcica	113
5.3.3 Índice de Saturación.....	117
5.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y CALIDAD DEL AGUA	121
5.4.1 Parámetros fisicoquímicos	121
5.4.2 Elementos mayores.....	123
5.4.3 Elementos minoritarios.....	124

5.4.4	Elementos traza.....	124
5.5	ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AGUA	125
5.6	ANÁLISIS ESTADÍSTICO BIVARIADO	129
5.6.1	Coeficiente de correlación.....	129
5.6.2	Índices hidrogeoquímicos.....	132
5.7	ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS E HIDROGEOQUÍMICOS.	139
5.7.1	Temperatura.....	139
5.7.2	Potencial de Hidrogeno (pH).....	140
5.7.3	Potencial de óxido reducción (Eh).....	142
5.7.4	Conductividad Eléctrica (CE)	143
5.7.5	Oxígeno Disuelto (OD)	145
5.7.6	Sólidos totales disueltos (STD)	146
5.7.7	Iones mayoritarios	148
5.7.7.1	Sodio (Na ⁺)	148
5.7.7.2	Potasio (K ⁺).....	149
5.7.7.3	Calcio (Ca ²⁺)	150
5.7.7.4	Magnesio (Mg ²⁺)	151
5.7.7.5	Cloruros (Cl ⁻).....	152
5.7.7.6	Sulfatos (SO ₄ ²⁻).....	153
5.7.7.7	Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	154
5.7.7.8	Nitratos (NO ₃ ⁻).....	155
5.7.8	Iones minoritarios	156
5.7.8.1	Boro (B ³⁺).....	156
5.7.8.2	Fluoruros (F ⁻)	157
5.7.8.3	Hierro (Fe)	158
5.7.8.4	Litio (Li ⁺).....	159
5.7.9	Elementos traza.....	160
5.7.9.1	Aluminio (Al ³⁺).....	160
5.7.9.2	Arsénico (As)	161
5.7.9.3	Cadmio (Cd ²⁺).....	162
5.7.9.4	Plomo (Pb ²⁺)	163
5.8	ANÁLISIS ESTADÍSTICO MULTIVARIADO	164
5.8.1	Análisis de conglomerados, clúster o jerárquico.....	164
5.9	ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE LA COMPOSICIÓN HIDROGEOQUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA	167
5.9.1	Elementos mayoritarios.....	167
5.9.2	Elementos minoritarios y traza.....	168
5.10	ANÁLISIS DE LA RELACIÓN DE LA PROFUNDIDAD Y COMPOSICIÓN HIDROGEOQUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA	169
5.11	ORIGEN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	171
5.12	ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO	172
5.13	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	175
5.14	DISCUSIONES.....	177
CAPITULO VI.	184
6.	CONCLUSIONES.....	184
7.	RECOMENDACIONES	186
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	187
9.	ANEXOS	195

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización hidrológica del área de estudio. -----	19
Figura 2. Abatimiento del nivel estático acuífero del Valle de Querétaro. -----	20
Figura 3. A) Comportamiento piezométrico de 45 pozos ubicados al poniente de la Falla Central para el periodo de 1970 al 2003. B) Comportamiento piezométrico de 24 pozos ubicados al oriente de la Falla Central del periodo de 1970 al 2003 (Fuente: Carreón et al., 2005). -----	21
Figura 4. A) Mapa de los descensos de la carga hidráulica del valle de Querétaro de 1970 a 1980 y B) Mapa de los descensos del nivel del agua subterránea para el periodo de 1990 a 2002 (Fuente: Carreón et al., 2005). -----	21
Figura 5. Mapa de la distribución de la temperatura del valle de Santiago Querétaro. -----	23
Figura 6. A) Gráfica de la concentración de nitratos. B) Gráfica de la concentración fluoruros comparadas con la norma NOM-127-SSA1-1994 de la zona del valle de Santiago Querétaro (Fuente: con base a datos de Serrano, 2007). -----	24
Figura 7. A) Gráfica de la concentración de nitratos. B) Gráfica de la concentración fluoruros. C) Gráfica de la concentración de arsénico. D) Gráfica de la concentración de plomo comparadas con la NOM-127-SSA1-1994 de la zona del valle de Santiago Querétaro (Fuente: con base a datos de Serrano, 2007). -----	24
Figura 8. Diagrama de los diferentes tipos de agua determinados por cada autor.-----	25
Figura 9. Diagramas de Piper muestran las facies químicas del agua subterránea: A) Simbología de las facies de agua. B) Serrano, 2007. C) Pérez, 2008 y D) Suez-Lesser; CEAQ, 2017.-----	25
Figura 10. Modelo geológico conceptual regional de Celaya a Querétaro (Fuente: López, 1996). -----	27
Figura 11. Modelo geológico de la sección del valle de Querétaro (Fuente: Pacheco, 2007). -	27
Figura 12. Sección geológica del acuífero de Querétaro (Fuente: Carreón et al., 2016). -----	27
Figura 13. Sección geológica del valle de Querétaro (Suez-Lesser; CEAQ, 2017). -----	27
Figura 14. Mapa del área de estudio mostrando la ubicación de las secciones geológicas de los antecedentes históricos. -----	28
Figura 15. Gráfica de isotopos de $\delta^{18}O$ contra δD del agua subterránea (Fuente: Carreón-Freyre et al., 2005).-----	29
Figura 16. Gráfica de isotopos estables del agua subterránea de la ciudad de Santiago Querétaro comparadas con la línea meteórica mundial y local (Fuente: Serrano, 2007).-----	29
Figura 17. Gráfica de deuterio vs oxígeno 18 para el Valle de Querétaro (Fuente: Lesser, CEAQ, 2017).-----	30
Figura 18. Composición isotópica del agua subterránea del Valle de Querétaro (Fuente: Mejía et al., 2018). -----	30
Figura 19. Esquema de los sistemas de flujo (Tóth, 1999; tomada de Peñuela–Arévalo, 2007). -----	40
Figura 20. Procesos de interacción en un sistema acuoso (Fuente: Merkel y Planer 2005). ---	50
Figura 21. Proceso de adsorción y absorción (Tomada de Appelo y Postma, 2005).-----	53
Figura 22. Mapa de la ubicación de los 30 pozos de agua del área de estudio (Fuente: elaboración propia con base a datos de INEGI, 2010 a y b). -----	61
Figura 23. A) Equipo de medición. B) Pozo el Castillo. C) Medición del nivel piezométrico mediante una sonda.-----	62

Figura 24. Mapa de la ubicación de los 19 pozos de agua y un manantial termal del área de estudio (Fuente: elaboración propia con base a datos de INEGI, 2010 a y b)-----	65
Figura 25. A) Multiparamétrico (Multi-parameter Multiline P4) para la medición del pH, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto, potencial redox y sólidos disueltos totales. B) Pozo muestreado, encargado de la Comisión Estatal del Agua de Querétaro. C) Muestreo del manantial termal Salitre. -----	66
Figura 26. Representación del diagrama triangular de Piper (A) y diagrama de Stiff (B) (Fuente: Freeze y Cherry, 1978). -----	68
Figura 27. Mapa geográfico de la ubicación del área de estudio. -----	74
Figura 28. Mapa del clima del área de estudio (Fuente: elaboración propia de acuerdo a datos vectoriales de CONABIO, 1998; García et al., 1999; INEGI, 2010 a y b y CONAGUA, 2015b). -----	75
Figura 29. Mapa de la temperatura media anual del área de estudio (Fuente: elaboración propia con base a datos vectoriales de Vidal-Zepeda, 1990b). -----	76
Figura 30. Mapa de precipitación media anual (1990-1992) del área de estudio. -----	77
Figura 31. Tipo de suelo del área de estudio. -----	78
Figura 32. Mapa de las zonas agrícolas. -----	79
Figura 33. Mapa de las zonas industriales del área de estudio. -----	80
Figura 34. Mapa de las provincias fisiográficas de México (Fuente: Raisz, 1964). -----	82
Figura 35. Mapa geomorfológico del área de estudio. -----	84
Figura 36. Modelo digital de elevación de la zona del valle de Obrajuelo-Querétaro (Fuente propia con base a datos de INEGI, 2010 a y b; CONAGUA, 2015b). -----	84
Figura 37. Subcuenca Río Apaseo ubicando el área de estudio. -----	87
Figura 38. Ubicación de los acuíferos administrativos. -----	88
Figura 39. Usos del agua subterránea. -----	90
Figura 40. Mapa geológico de la zona de Obrajuelo Guanajuato que muestran las principales unidades litológicas. (Fuente propia: con base a datos de Alanís et al. 2001 y Consejo de Recursos Minerales, 1999). -----	96
Figura 41. Columna estratigráfica de la zona de Obrajuelo-Querétaro que muestran las principales unidades litológicas (Fuente: elaboración propia con base a datos de Alanís et al. 2001 y Consejo de Recursos Minerales, 1999).-----	97
Figura 42. Mapa geológico-estructural de la zona de estudio que muestran las principales fallas y fracturas de la zona de estudio (Fuente propia: con base a datos de Alanís et al. 2001 y Consejo de Recursos Minerales, 1999).-----	103
Figura 43. Niveles de profundidad de los 30 pozos monitoreados en el área de estudio.-----	105
Figura 44. Niveles de profundidad de los pozos muestreados para el análisis hidrogeoquímico. -----	105
Figura 45. Mapa piezométrico de la zona comprendida de Obrajuelo-Querétaro. -----	106
Figura 46. Mapa de la ubicación espacial de los pozos. -----	110
Figura 47. Diagrama de Piper. -----	114
Figura 48. Diagramas de Stiff de las muestras dl agua subterránea de la zona de estudio. --	115
Figura 49. Mapa de la variación espacial de los diagramas de stiff obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	116
Figura 50. Índice de saturación de la Albita en función de la conductividad eléctrica. -----	118
Figura 51. Índice de saturación del feldespato k en función de la conductividad eléctrica. ----	118

Figura 52. Índice de saturación de la mica k en función de la conductividad eléctrica (Fuente: Elaboración propia).-----	119
Figura 53. Índice de saturación de la calcita en función de la conductividad eléctrica (Fuente: Elaboración propia).-----	120
Figura 54. Índice de saturación de la fluorita en función de la conductividad eléctrica (Fuente: Elaboración propia).-----	120
Figura 55. Diagramas de cajas y bigotes para los parámetros fisicoquímicos de las 21 muestras de agua (Fuente: elaboración propia).-----	123
Figura 56. Diagramas de cajas y bigotes de los elementos mayoritarios de las 21 muestras de agua subterránea (Fuente: elaboración propia).-----	123
Figura 57. Diagramas de cajas y bigotes para los elementos minoritarios de las 21 muestras de agua subterránea (Fuente: elaboración propia).-----	124
Figura 58. Diagramas de cajas y bigotes de los elementos traza de las 21 muestras de agua subterránea (Fuente: elaboración propia).-----	124
Figura 59. Mapa de la distribución de la calidad del agua subterránea de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales INEGI, 2010 a y b);.-----	127
Figura 60. Diagrama de la relación de temperatura/conductividad eléctrica (T/CE).-----	130
Figura 61. Diagrama de dispersión de la relación CE/SD.-----	131
Figura 62. Relación iónica calcio/magnesio (rCa^{+2}/rMg^{+2}) de las muestras del agua.-----	132
Figura 63. Relación iónica sodio/calcio (rNa^{+}/rCa^{+2}) de las muestras del agua.-----	133
Figura 64. Relación iónica sodio/calcio ($rNa^{+}/rCa^{+2}+rMg^{+2}$) de las muestras del agua.-----	134
Figura 65. Relación iónica sulfato/cloro (rSO_4^{2-}/rCl^{+2}) de las muestras del agua.-----	134
Figura 66. Relación iónica cloro y bicarbonato ($rCl^{+2}/rHCO_4^{2-}$) de las muestras del agua.-----	135
Figura 67. Relación iónica cloro y sodio (rCl/rNa^{+}) de las muestras del agua.-----	136
Figura 68. Relación iónica de la conductividad eléctrica y nitratos (rCE/rNO_3^{-}) de las muestras del agua.-----	136
Figura 69. Relación iónica litio y boro (rLi^{+}/rB^{+3}) de las muestras del agua.-----	137
Figura 70. Relación iónica litio y flúor (rLi^{+}/rF^{-}) de las muestras del agua.-----	138
Figura 71. Gráfica de los datos de temperatura.-----	139
Figura 72. Mapa de la variación espacial de los datos de temperatura obtenidos de los pozos muestreados (Fuente: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	140
Figura 73. Gráfica de los valores de pH de los pozos muestreados.-----	141
Figura 74. Mapa de la distribución espacial de los datos de pH.-----	141
Figura 75. Gráfica de los valores de Eh de los pozos muestreados.-----	142
Figura 76. Mapa de la variación espacial de los datos de Eh obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	143
Figura 77. Gráfica de los valores de CE de los pozos muestreados.-----	144
Figura 78. Mapa de la variación espacial de los datos de CE obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	144
Figura 79. Gráfica de los valores de oxígeno disuelto.-----	145
Figura 80. Mapa de la variación espacial de los datos de OD obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	146
Figura 81. Gráfica de los valores de STD.-----	147

Figura 82. Mapa de la variación espacial de los datos de SDT obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	147
Figura 83. Mapa de la variación espacial de los datos de sodio obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	148
Figura 84. Mapa de la variación espacial de los datos de potasio obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	149
Figura 85. Mapa de la variación espacial de los datos de calcio obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	150
Figura 86. Mapa de la variación espacial de los datos de potasio obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	151
Figura 87. Mapa de la variación espacial de los datos de cloruros obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	152
Figura 88. Mapa de la variación espacial de los datos de sulfatos obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	153
Figura 89. Mapa de la variación espacial de los datos de bicarbonato obtenidos de los pozos muestreados (Fuente: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	154
Figura 90. Mapa de la variación espacial de los datos de nitratos obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	155
Figura 91. Mapa de la variación espacial de los datos de boro obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	156
Figura 92. Mapa de la variación espacial de los datos de fluoruros obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	157
Figura 93. Mapa de la variación espacial de los datos de hierro obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	158
Figura 94. Mapa de la variación espacial de los datos de litio obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	159
Figura 95. Mapa de la variación espacial de los datos de aluminio obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	160
Figura 96. Mapa de la variación espacial de los datos de arsénico obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	161
Figura 97. Mapa de la variación espacial de los datos de cadmio obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	162
Figura 98. Mapa de la variación espacial de los datos de plomo obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).-----	163
Figura 99. Dendograma de las 21 muestras del agua subterránea del área de estudio. -----	164
Figura 100. Mapa de la distribución espacial de la clasificación del agua subterránea del área de estudio (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales INEGI, 2010b). -----	166
Figura 101. Diagramas de cajas y bigotes de los elementos mayoritarios de los estudios de 2007, 2008 y 2018 (Fuente: elaboración propia con base a datos de Serrano, 2007 y Pérez, 2008). -----	168
Figura 102. Diagramas de blox-plot de los elementos minoritarios y traza para los años 2007, 2008 y 2018 (Fuente: elaboración propia con base a datos de Serrano, 2007 y Pérez, 2008). -----	169
Figura 103. Gráfica de la relación de la profundidad y el análisis de conglomerados. -----	170

Figura 104. Mapa hidrogeológico (Fuente: elaboración con base a datos de Alaniz-Álvarez et al., 2001 y Consejo de Recursos Minerales, 1999).-----172

Figura 105. Perfiles litológicos de los pozos de la zona de Obrajuelo (Fuente: elaboración con base a datos de Alaniz-Álvarez et al., 2001; Carreón et al. 2016; Suez-Lesser, 2017; IMTA, 2018).
-----173

Figura 106. Perfiles litológicos de los pozos de la zona de Querétaro (Fuente: elaboración con base a datos de Alaniz-Álvarez et al., 2001; Carreón et al. 2016; Suez-Lesser, 2017; IMTA, 2018).
-----173

Figura 107. Sección hidrogeológica de norte a sur, integrando datos piezométricos y dirección del flujo (Fuente: elaboración con base a datos de Alaniz-Álvarez et al., 2001; Carreón et al. 2016; Suez-Lesser, 2017; IMTA, 2018).-----174

Figura 108. Sección geológica de oeste a este, integrando datos piezométricos y dirección del flujo (Fuente: elaboración con base a datos de Alaniz-Álvarez et al., 2001; Carreón et al. 2016; Suez-Lesser, 2017; IMTA, 2018).-----174

Figura 109. Modelo hidrogeológico del acuífero del Valle de Obrajuelo-Querétaro. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).-----176

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Abatimientos por año del agua subterránea de la zona de Querétaro. -----	22
Tabla 2. Clasificación de aguas subterráneas de acuerdo a la temperatura. -----	41
Tabla 3. Clasificación de aguas subterráneas de acuerdo a la temperatura. -----	42
Tabla 4. Componentes más importantes encontrados en la presente investigación. -----	45
Tabla 5. Índices hidrogeoquímicos. -----	49
Tabla 6. Ubicación de los 30 pozos monitoreados. -----	60
Tabla 7. Parámetros físico químicos e hidrogeoquímicos. -----	63
Tabla 8. Localización de los pozos muestreados. -----	64
Tabla 9. Parámetros y objetivos considerados para la evaluación del índice CCME-WQI para el uso de abastecimiento y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994). -----	70
Tabla 10. Criterios para la clasificación de la calidad del agua subterránea. -----	73
Tabla 11. Datos geográficos y socioeconómicos por región hidrológico-administrativa. -----	85
Tabla 12. Característica de la región hidrológica Lerma-Santiago. -----	85
Tabla 13. Características del acuífero administrativo 2201. -----	89
Tabla 14. Usos del agua subterránea de pozos activos del área de estudio. -----	90
Tabla 15. Composición mineralogía para los diferentes tipos de rocas. -----	98
Tabla 16. Descripción de fallas del área de estudio. -----	99
Tabla 17. Resultados de las mediciones piezométricas tomadas en campo. -----	104
Tabla 18. Resultados de los parámetros fisicoquímicos tomados in situ. -----	107
Tabla 19. Resultados de los análisis de laboratorio de los elementos mayoritarios. -----	108
Tabla 20. Resultados de los análisis de laboratorio de los elementos minoritarios y traza. ----	109
Tabla 21. Resultados del porcentaje de error del balance iónico de las 21 muestras del área de estudio. -----	111
Tabla 22. Familia de aguas y tipos de flujo. -----	112
Tabla 23. Resumen estadístico de la composición química de las muestras del agua subterránea. -----	121
Tabla 24. Clasificación de la Calidad del Agua. -----	125
Tabla 25. Resultados de los índices de calidad de los pozos de agua muestreados. -----	126
Tabla 26. Evaluación de la calidad del agua subterránea con respecto a los criterios de la NOM-127-SSA1-1994 y la OMS. -----	128
Tabla 27. Matriz de correlación entre las variables -----	129
Tabla 28. Elementos de origen natural de acuerdo a las características del área de estudio. 171	
Tabla 29. Elementos que tienen un origen antropogénico de acuerdo a las características del área de estudio. -----	171

RESUMEN

El área de estudio de Obrajuelo-Querétaro se encuentra ubicada en la región hidrológica Lerma-Santiago en la cuenca Río La Laja y subcuenca del Río Apaseo, pertenece a la zona fisiográfica denominada Faja Volcánica Transmexicana, provocando zonas de fallamiento, fracturamiento e hidrotermalismo. La zona de estudio se abastece principalmente de agua subterránea utilizada para uso y consumo humano, riego agrícola e industrial; lo cual, ha generado una problemática en el deterioro tanto en cantidad como en calidad de los mantos acuíferos debido a la gran demanda de estos servicios.

La presente investigación se llevó a cabo una evaluación hidrogeológica con base en la integración de datos geológicos, hidrodinámicos e hidrogeoquímicos para identificar las variables que determinan el comportamiento de los sistemas de flujo subterráneos. Para ello, la investigación se desarrolló en 5 etapas; en la primera etapa se recopiló toda información disponible (hidrología, geología, uso de suelo y vegetación); en la segunda etapa se realizó el muestreo en campo en la temporada de lluvias y estiaje, que consistió en la medición del nivel estático de 30 pozos presentando una profundidad media de 120 m. Se analizaron 19 pozos y un manantial termal en el cual se midió *in situ* 6 parámetros fisicoquímicos: pH, temperatura, potencial redox, sólidos disueltos totales, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica; se colectaron 21 muestras de agua tomando en cuenta 27 parámetros hidrogeoquímicos procesados en el laboratorio de La Unidad Académica Juriquilla del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Al^{3+} , As, B^{3+} , Ba^{2+} , Ca^{2+} , Cd^{2+} , Cl^- , Cu^{2+} , F^- , Fe, HCO_3^- , K^+ , Li^+ , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Na^+ , Ni^{2+} , NO_3^- , Pb^{2+} , S^{2-} , Si^{4+} , SO_4^{2-} , Sr^{2+} , V, Zn^{2+} y dureza) mediante los métodos ICP/OES, ICP/MS, LC, respectivamente.

De acuerdo al análisis piezométrico, el acuífero presenta una zona de abatimiento y dirección del flujo hacia las comunidades de Sta. María Magdalena, el Pueblito y el Castillo. Se evaluó la calidad del agua, mediante el índice de calidad del agua canadiense utilizando 17 parámetros y comparándolos con la NOM-127-SSA1-1994 (Modificada en el 2000), obteniendo como resultado pozos de regular a buena calidad, sin embargo, el pozo Balvanera, la Norita y el Castillo presentaron concentraciones de elementos de Al^{3+} , As, Cd^{2+} , F^- , Fe y Pb^{2+} por arriba de la citada norma, esto debido a la influencia del manantial termal Salitre. Se encontraron concentraciones considerables de NO_3^- en 15 pozos (11.5 mg/L a 56.4 mg/L), provocado por la intensa actividad agrícola. Se determinaron dos tipos de agua: Bicarbonatada Cálcica y Bicarbonatada Sódica que corresponde a un agua de reciente infiltración ($\text{HCO}_3^- > \text{SO}_2 > \text{Cl}$). Mediante las herramientas estadísticas multivariadas (análisis de conglomerados) se identificaron cinco agrupamientos de las 33 variables analizadas, lo que permitió correlacionar los pozos de acuerdo a la similitud de su composición química y se demostró que las aguas del manantial termal Salitre (flujo regional) están interactuando con los flujos locales e intermedios del área de estudio.

Palabras clave: sistemas de flujo, calidad del agua e hidrogeología.

CAPITULO I.

1. INTRODUCCIÓN

La hidrología de una región está regida por su clima, vegetación, topografía y geología, aunque las actividades antropogénicas modifican el medio ambiente, alterando el funcionamiento natural del ciclo hidrológico y su dinámico equilibrio. Si bien, el volumen total de agua en movimiento permanece constante, su distribución y composición cambia continuamente en continentes, regiones y cuencas locales de escurrimiento (Mecca, 2008).

El agua subterránea es un recurso estratégico para el ser humano (abastecimiento de agua para consumo humano, actividades industriales, agrícolas y recreativas) y para el medio ambiente. Por sus características de permanencia en el tiempo y espacio, a diferencia de muchas corrientes superficiales, no está sujeta a las variaciones de precipitación pluvial anual, por lo que puede ser vital, sobre todo en época de sequías (Escolero *et al.*, 2017).

El agua subterránea a nivel global, tiene una importancia fundamental para el suministro de agua potable, y se explotan intensivamente para usos privados, domésticos, agrícolas, industriales y en muchos centros urbanos de los países en desarrollo. Al mismo tiempo, se han identificado graves problemas como el abatimiento y reducción del almacenamiento de los acuíferos, intrusión salina (producto de la sobreexplotación), conflictos en acuíferos transfronterizos, contaminación y degradación de la calidad del agua. La escala o el grado de la degradación varían de acuerdo a la susceptibilidad de los acuíferos al deterioro relacionado con la explotación y a su vulnerabilidad a la contaminación (Foster S. *et al.*, 1998; Escolero *et al.*, 2017).

El agua subterránea en México, es el recurso más utilizado para usos consuntivos y representa un 39% de volumen total concesionado (33819 hm³ por año al 2016). Para fines administrativos del agua subterránea en el país se ha dividido en 653 acuíferos, de los cuales 105 están sobreexplotados, 18 con intrusión de agua marina y 18 están expuestos a fenómenos de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres. Sin

embargo, se han encontrado el deterioro de la calidad del agua provocado por factores antropogénicos (CONAGUA, 2017).

Por lo tanto, las aguas subterráneas desempeñan un papel muy importante en el crecimiento socioeconómico del país, gracias a sus características físicas que permiten ser aprovechadas de manera versátil, pues funcionan como presas de almacenamiento y red de distribución, siendo posible extraer agua en cualquier época del año de prácticamente cualquier punto de la superficie del acuífero. Funcionan además como filtros purificadores, preservando la calidad del agua (CONAGUA, 2017).

En los últimos 25 años la Zona Metropolitana de Querétaro ha desarrollado crecientes y complejos problemas, en relación con los recursos hídricos requeridos para satisfacer sus necesidades presentes y futuras, por lo que necesita agua suficiente para cubrir la demanda de la agricultura, la industria y el uso doméstico. Al mismo tiempo se genera un deterioro en la calidad del agua, esto debido a una serie de factores tales como: infiltración de residuos industriales, agroquímicos, residuales o procesos naturales en la interacción de agua-roca (Comisión Estatal del Agua de Querétaro, 2011).

El presente trabajo de investigación comprende desde la localidad de Obrajuelo, municipio de Apaseo el Grande, Estado de Guanajuato a la ciudad de Querétaro. Se encuentra dentro del acuífero administrativo Valle de Querétaro, y de acuerdo a CONAGUA, (2017), se encuentran en condiciones de sobreexplotación.

Debido a lo anterior, la presente investigación tiene como finalidad realizar una evaluación hidrogeológica, mediante la integración de datos hidrológicos, topográficos, geológicos, hidrodinámicos e hidrogeoquímicos para identificar las principales variables que determinan el comportamiento, composición y evolución del agua subterránea del área de estudio.

1.1 Planteamiento del problema

En la zona comprendida de Obrajuelo-Querétaro, el agua subterránea representa la principal fuente de abastecimiento para uso y consumo humano, actividades agrícolas e industriales. Pero el crecimiento urbano y sus actividades han alterado tanto en cantidad como en calidad a los mantos acuíferos. Sin embargo, en la región existen fuentes naturales que modifican la composición química del agua subterránea, como es el caso de la interacción agua-roca, zonas hidrotermales y los sistemas de fallas y fracturas.

La extracción del agua subterránea de la zona de estudio se han encontrado concentraciones de nitratos, flúor, arsénico y plomo, por arriba de los límites permisibles de la norma NOM-127-SSA1-1994. Estos elementos químicos están asociados a zonas hidrotermales y provocadas por las actividades antropogénicas.

La zona de estudio comprende la parte media de la subcuenca del río Apaseo, y el río Querétaro es la principal corriente que presenta un rumbo de este a oeste. Durante su recorrido recibe una gran cantidad de descargas de aguas residuales e industriales de todas las zonas conurbanas de la región. El polígono de estudio presenta un área de 763 km², con una elevación media de 1810 msnm (Figura 1). Dicha área, se concentra una gran actividad agrícola, industrial y urbana.

Por ello se propone realizar una evaluación hidrogeológica integrando información hidrológica, topográfica, geológica, hidrogeoquímica e hidrodinámica para obtener información detallada y actualizada que determine el comportamiento de los sistemas de flujo subterráneo, las variables que afectan al sistema y sus efectos sobre la composición química del agua subterránea.

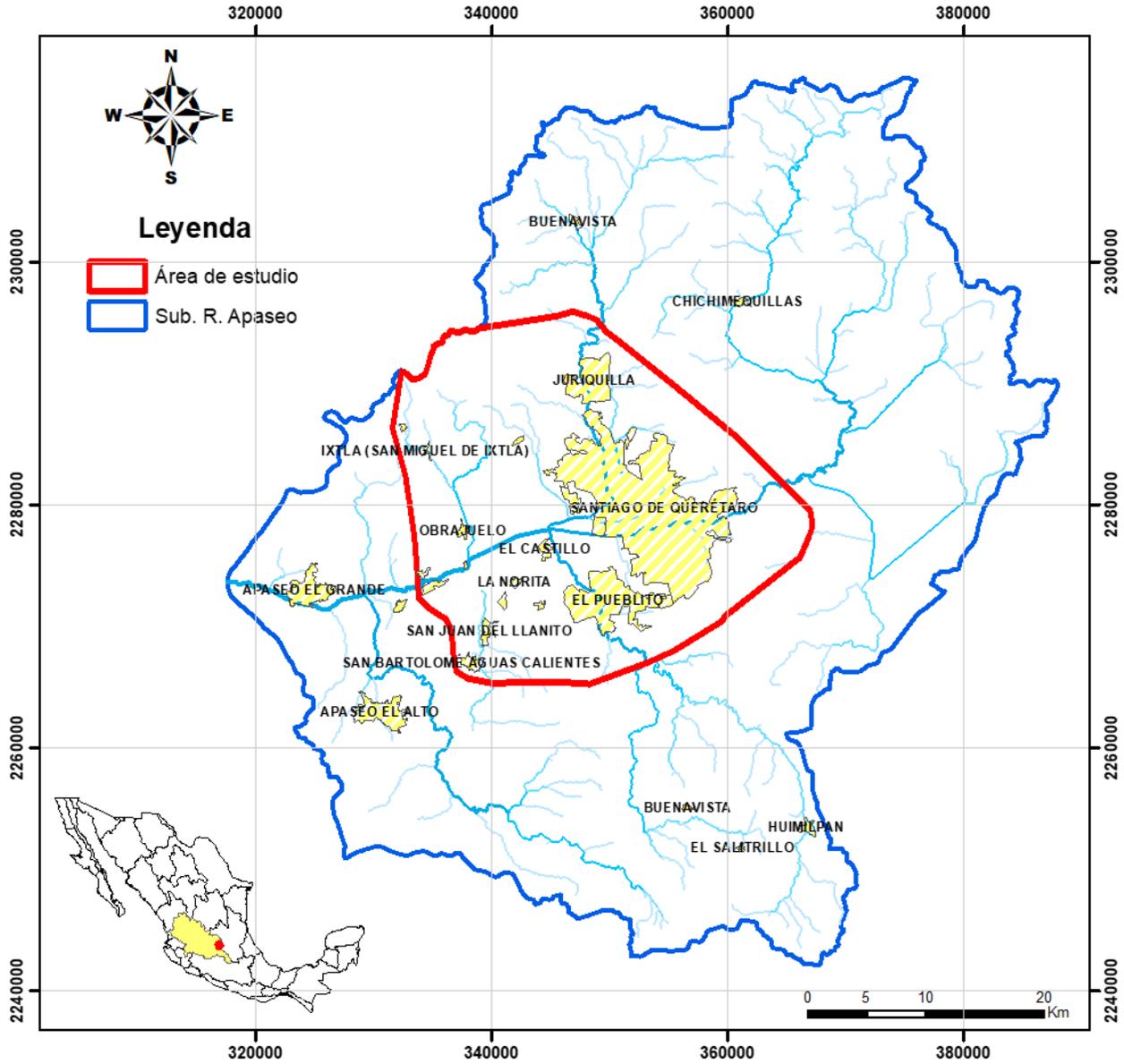


Figura 1. Localización hidrológica del área de estudio.

1.2 Antecedentes

Dentro del polígono de la zona de estudio (Obrajuelo-Querétaro) ha sido objeto de diversas investigaciones relacionadas al recurso hídrico subterráneo, a continuación, se mencionan los trabajos más relevantes y que pudieran complementar a la investigación.

1.2.1 Cantidad del agua subterránea

La Comisión Estatal del Agua de Querétaro (2002), realizó un análisis del abatimiento general del nivel estático de acuífero del Valle de Querétaro y menciona que existe un sistema de acuíferos. En la Figura 2, se observa de manera esquemática el abatimiento del acuífero del valle de Querétaro para el periodo de 1940 al 2000.

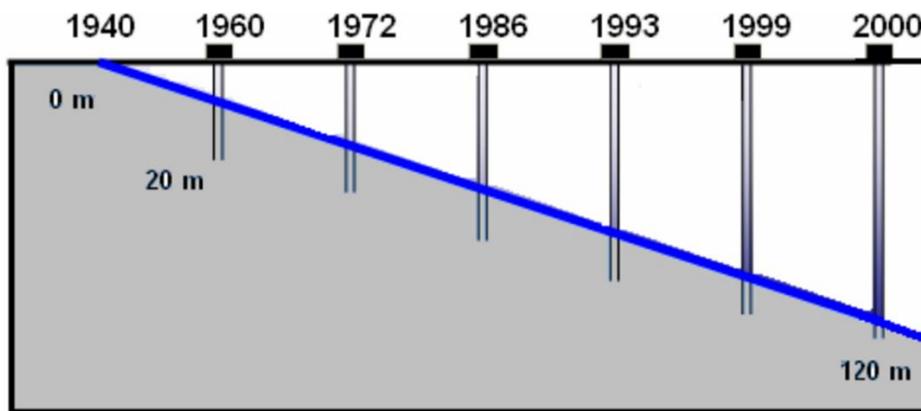


Figura 2. Abatimiento del nivel estático acuífero del Valle de Querétaro. (Fuente: CEAQ, 2002, citado por Pérez, 2008).

Carreón *et al.* (2005), su estudio basado en el registro de 70 pozos de agua, con la finalidad de evaluar las condiciones del flujo subterráneo, integrando mediciones de 32 pozos de monitoreo y datos de niveles piezométricos de 196 pozos medidos entre los años de 1970 y 2003, determinó un abatimiento de la carga hidráulica en el Valle de Querétaro, entre 10 y 160 m durante las últimas dos décadas (Figura 3, A y B).

De acuerdo a Carreón *et al.* (2005), estas variaciones piezométricas están influenciadas por las discontinuidades estratigráficas y estructurales que producen un efecto en el flujo del agua subterránea de la zona de Querétaro (Figura 4, A y B). Y propone que el acuífero del Valle de Querétaro es de tipo multicapa constituido por un sistema de flujo local, intermedio y regional.

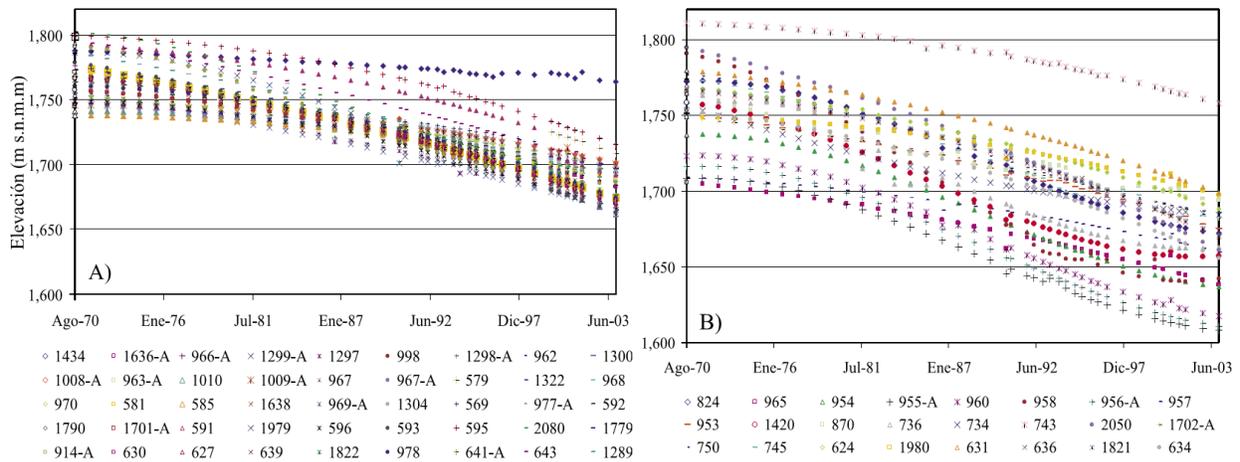


Figura 3. A) Comportamiento piezométrico de 45 pozos ubicados al poniente de la Falla Central para el periodo de 1970 al 2003. **B)** Comportamiento piezométrico de 24 pozos ubicados al oriente de la Falla Central del periodo de 1970 al 2003 (Fuente: Carreón *et al.*, 2005).

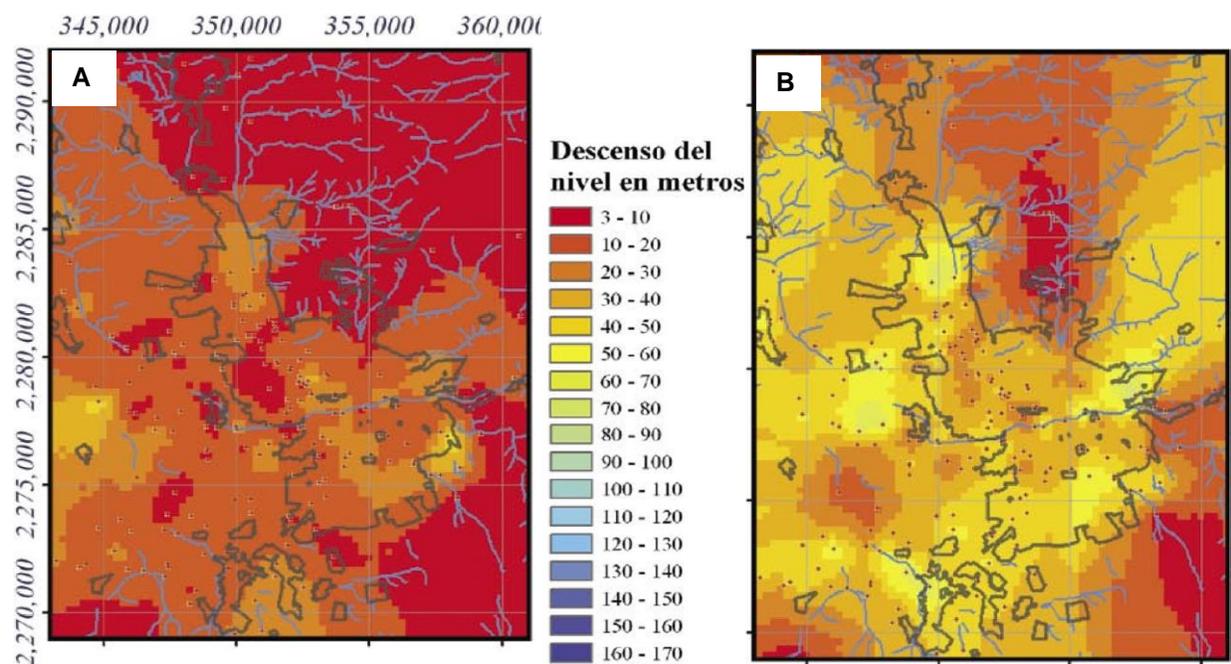


Figura 4. A) Mapa de los descensos de la carga hidráulica del valle de Querétaro de 1970 a 1980 y **B)** Mapa de los descensos del nivel del agua subterránea para el periodo de 1990 a 2002 (Fuente: Carreón *et al.*, 2005).

Pérez (2008), menciona que las características estratigráficas del subsuelo como fallas, fracturas y discontinuidades geológicas actúan como barreras o canales del flujo subterráneo. Por consiguiente, analizó que los niveles piezométricos de los últimos 40 años medidos en el acuífero del Valle Querétaro, registraron un descenso promedio de 120 m. Definió el acuífero Valle de Querétaro como multicapa, profundo, con interacciones de secuencias granulares y fracturadas.

En cuanto a los niveles de profundidad del agua subterránea, se registró un promedio de 70 m a 300 m de profundidad y se estimó un abatimiento de 1 a 4 m/año para el periodo de 1940 al 2003 (CEAQ, 2002; Gutiérrez *et al.*, 2002; Carreón *et al.* 2005; Herrera *et al.* 2007).

En la Tabla 1 se muestra el resumen de los estudios realizados para el acuífero del Valle de Querétaro, y se observan las estimaciones medias de los abatimientos para cada periodo correspondiente.

Tabla 1. Abatimientos por año del agua subterránea de la zona de Querétaro.

Abatimiento del agua subterránea			
Año de investigación	Periodo	Nivel de profundidad (m)	Abatimiento promedio (m/año)
La Comisión Estatal del Agua de Querétaro (2002)	1940 - 2000	80	1 a 4
Gutiérrez <i>et al.</i> (2002)	1995 - 2000	90 a 110	4
Carreón <i>et al.</i> (2005)	1970 - 2003	70 a 300	2
Herrera <i>et al.</i> (2007)	1990 - 1993, 1993 - 1995 1995 - 1999.	100 a 120	1.37 3.36 2.59

1.2.2 Calidad del agua subterránea

Serrano (2007) en su estudio realizado en el municipio de Apaseos y al sur de la ciudad de Querétaro en la zona de San Bartolo, reporta que el área está influenciada por hidrotermalismo. Encontró temperaturas máximas de 90°C al suroeste en la zona geotérmica Apaseos y al sur de la Ciudad de Querétaro en la zona termal San Bartolo (Figura 5).

En cuanto a la composición química de los pozos muestreados, reporto valores de nitratos (NO_3) que van desde los 10 mg/L a 117.1 mg/L. Estos valores rebasan la norma oficial mexicana (NOM-127-SSA1-1994) que establece un límite permisible de 10 mg/L, producto de la mezcla de aguas residuales y actividades agrícolas. Para las concentraciones de fluoruros reportaron valores que van de los 0.3 mg/L a los 25.8 mg/L, valores que rebasan la NOM-127-SSA1-1994 que establece un límite permisible de 1.5 mg/L. Estas anomalías de fluoruro se asocian principalmente a zonas termales (Figura 6, A y B).

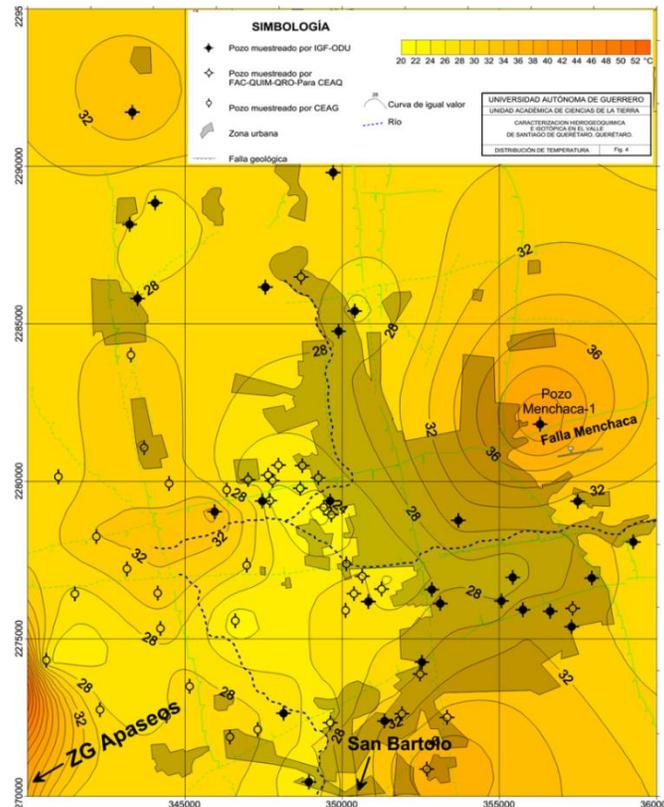


Figura 5. Mapa de la distribución de la temperatura del valle de Santiago Querétaro. (Fuente: Serrano, 2007).

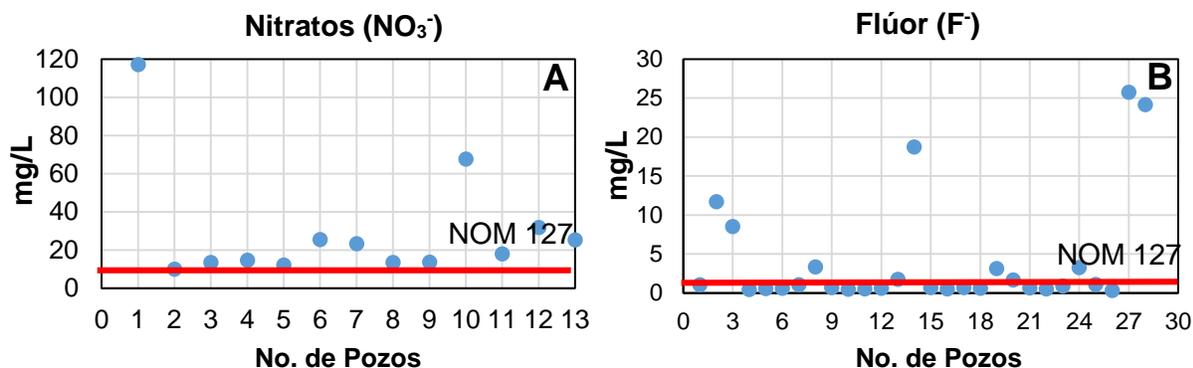


Figura 6. A) Gráfica de la concentración de nitratos. **B)** Gráfica de la concentración fluoruros comparadas con la norma NOM-127-SSA1-1994 de la zona del valle de Santiago Querétaro (Fuente: con base a datos de Serrano, 2007).

Pérez (2008), caracterizó la composición química del agua subterránea del Valle de Querétaro. Los elementos más significativos para este estudio que sobrepasan los límites permisibles establecidos por la norma (NOM-127-SSA1-1994), se muestran en la Figura 7, A, B, C y D.

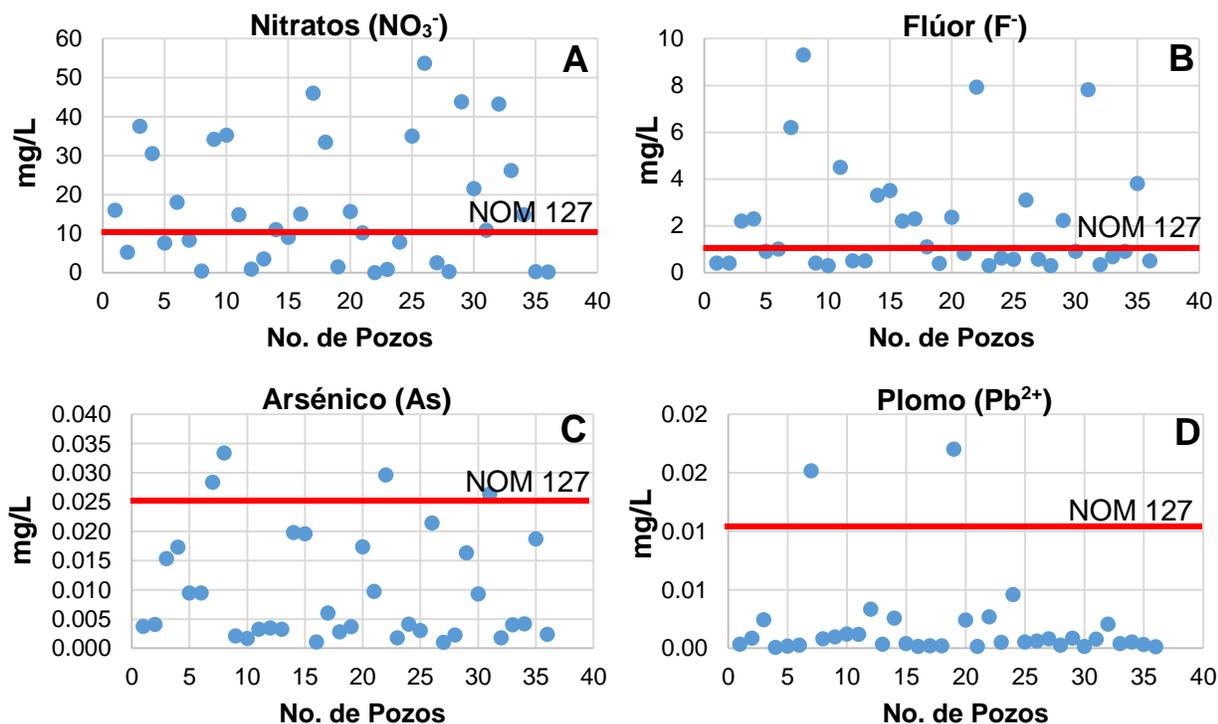


Figura 7. A) Gráfica de la concentración de nitratos. **B)** Gráfica de la concentración fluoruros. **C)** Gráfica de la concentración de arsénico. **D)** Gráfica de la concentración de plomo comparadas con la NOM-127-SSA1-1994 de la zona del valle de Santiago Querétaro (Fuente: con base a datos de Serrano, 2007).

1.2.3 Caracterización Hidrogeoquímica

1.2.3.1 Facies del agua subterránea

En la zona de Querétaro, diferentes autores han determinado diferentes tipos de facies o familias de agua, y se puede interpretar que la composición y evolución del agua subterránea se ha mantenido de bicarbonatada cálcica a bicarbonatada sódica, es decir, el agua bicarbonatada cálcica (Ca-HCO_3) fluye a través del material arcilloso-sódico lo que genera un proceso de intercambio catiónico y dando como resultado a un agua bicarbonatada sódica (Na-HCO_3). En la Figura 8 y 9 se muestra los resultados de los diferentes tipos de aguas para el periodo de 1996 al 2017.

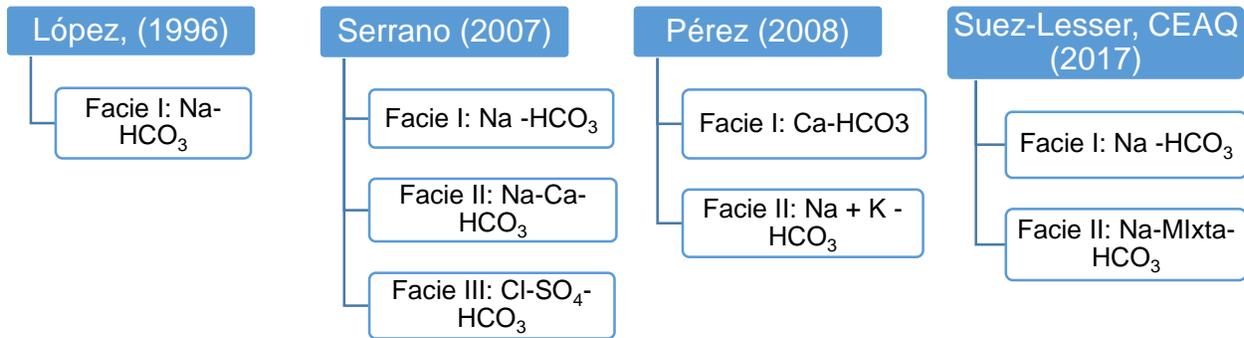


Figura 8. Diagrama de los diferentes tipos de agua determinados por cada autor.

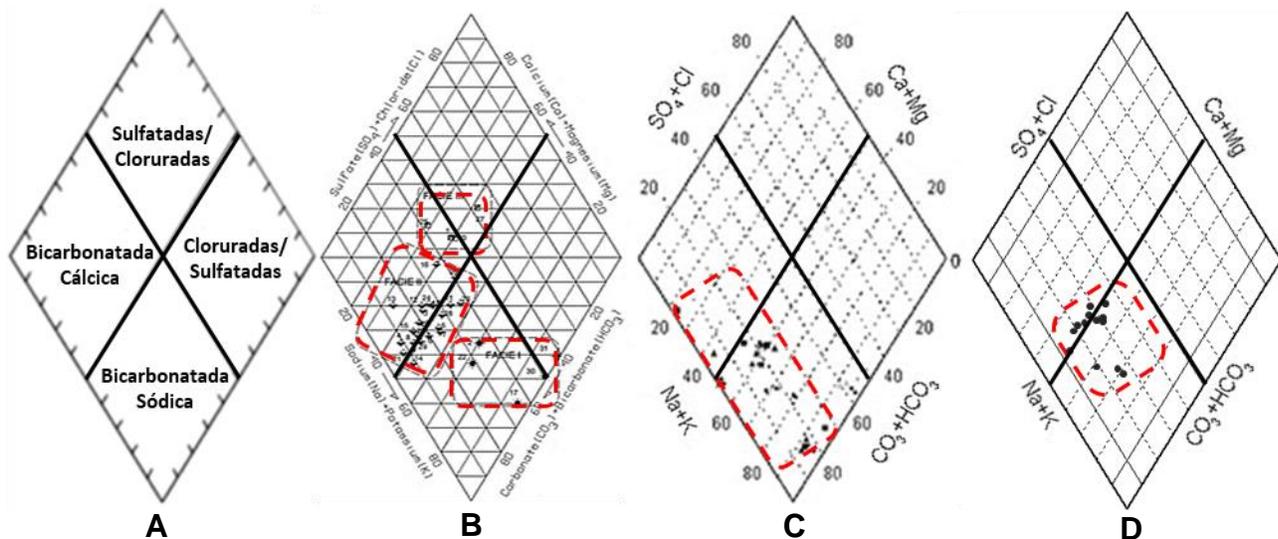


Figura 9. Diagramas de Piper muestran las facies químicas del agua subterránea: **A)** Simbología de las facies de agua. **B)** Serrano, 2007. **C)** Pérez, 2008 y **D)** Suez-Lesser; CEAQ, 2017.

1.2.4 Hidrogeología

López (1996) realizó un modelo geológico conceptual de un sistema hidrotermal no volcánico, de oeste a este. Menciona que es una zona hidrotermal formada por un sistema de cuencas escalonadas e interconectadas hidrológicamente, limitadas por fallas regionales donde los fluidos son forzados a ascender por zonas de debilidad, generadas principalmente por la falla San Bartolomé al oeste y la falla Querétaro al este, que funcionan como fronteras de la cuenca y produciendo una zona de convección forzada. Estas manifestaciones termales no están asociadas a la actividad volcánica reciente, por lo tanto, se debe a la circulación profunda de fluidos, movidos por el gradiente hidráulico regional (Figura 10).

Pacheco (2007) realizó un modelo geológico de una sección de oeste-este del acuífero del valle de Querétaro, interpretada a partir de datos gravimétricos y cortes litológicos de pozos. En dicho modelo se estableció el espesor del acuífero, así como los diferentes tipos de capas estratigráficas, lo cual ayudo a definir que el agua subterránea viaja a través de materiales granulares no consolidados (Figura 11).

Carreón *et al.* (2016) realizó un estudio sobre el desplazamiento de fallas y capas estratigráficas controladas por la subsidencia del terreno en el valle de Querétaro provocado por la extracción del agua subterránea. El modelo se construyó a partir de la correlación de registros litológicos de pozo, resaltando las discontinuidades entre las unidades estratigráficas. En el estudio se determinó la distribución de la tensión y desplazamientos de las capas litológicas del subsuelo y el acuífero se definió como multicapa, semiconfinado y compartimentado, delimitado por un sistema de fallas. Se menciona que la ciudad de Querétaro está colocada sobre una serie de rocas de flujos de lava basáltica intercalados con una unidad piroclástica. Las capas superficiales están compuestas por materiales piroclásticos (llamados depósitos volcanoclásticos) cubiertos por limos y arcillas lacustres (Figura 12).

Suez-Lesser; CEAQ (2017) realizó un estudio hidrogeológico del acuífero del valle de Querétaro con el propósito de establecer el comportamiento del acuífero y determinar posibles fuentes de abastecimiento para la zona metropolitana de Querétaro. Su sección geológica va de oeste-este y fue elaborada con base a cortes litológicos de pozos, donde se destacan las fallas geológicas de tipo normal dando origen a fosas y pilares tectónicos. El acuífero está constituido por materiales granulares (arenas y gravas) con horizontes de arcillas que se encuentra limitados principalmente por basaltos y andesitas. Presenta un nivel estático entre 130 a 140 metros de profundidad (Figura 13).

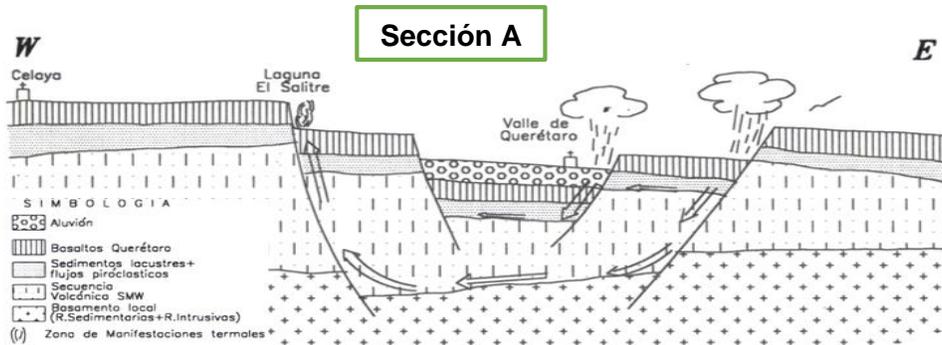


Figura 10. Modelo geológico conceptual regional de Celaya a Querétaro (Fuente: López, 1996).

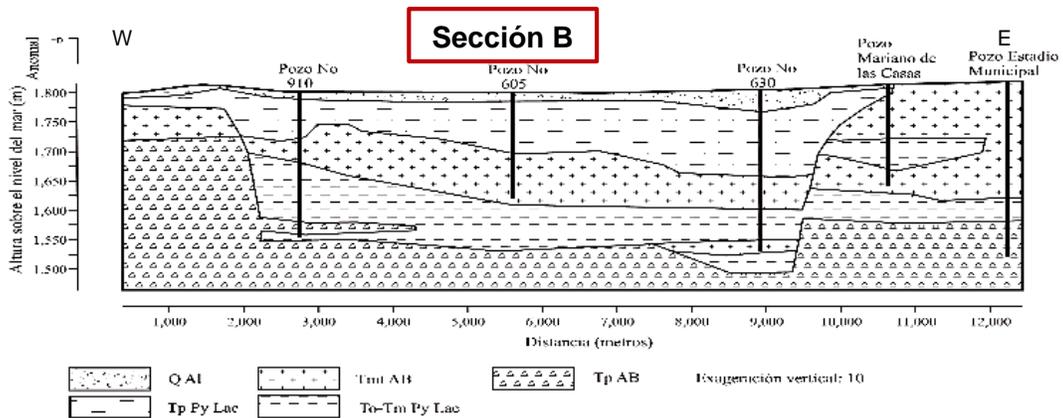


Figura 11. Modelo geológico de la sección del valle de Querétaro (Fuente: Pacheco, 2007).

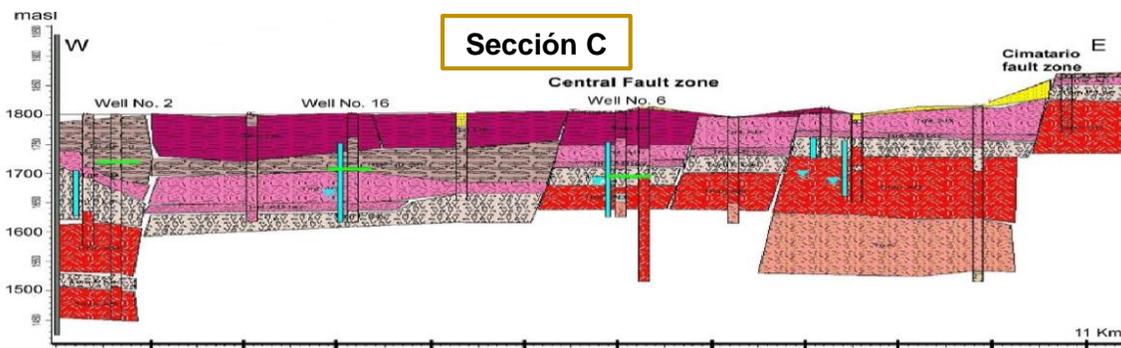


Figura 12. Sección geológica del acuífero de Querétaro (Fuente: Carreón *et al.*, 2016).

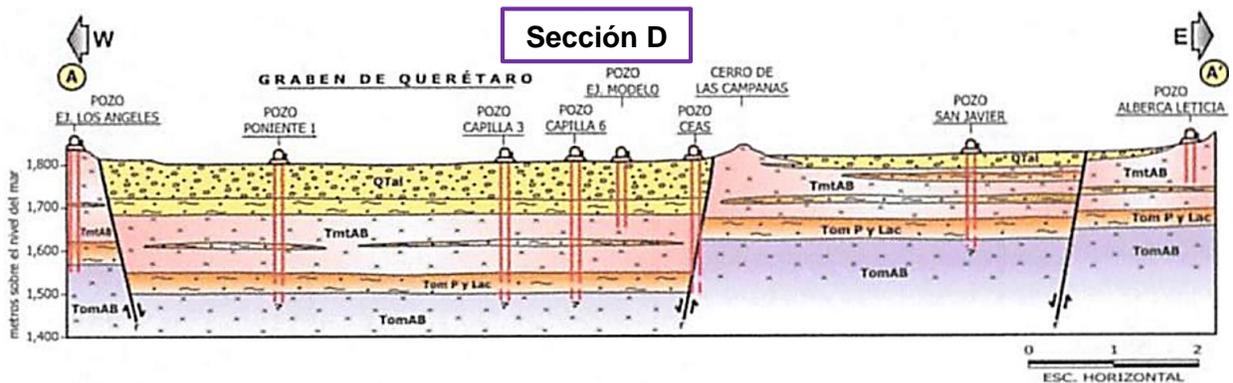


Figura 13. Sección geológica del valle de Querétaro (Suez-Lesser; CEAQ, 2017).

En la Figura 14, se muestran las ubicaciones de las secciones geológicas dentro del polígono del área de estudio. Para la sección A, corresponde al modelo geológico conceptual regional de Celaya a Querétaro de López (1996). La sección B, modelo geológico de la sección del valle de Querétaro de Pacheco (2007). En la sección C, pertenece al modelo geológico del acuífero de Querétaro de Carreón *et al.* (2016). Y finalmente en la sección D corresponde al modelo hidrogeológico del valle de Querétaro de Suez-Lesser; CEAQ, (2017).

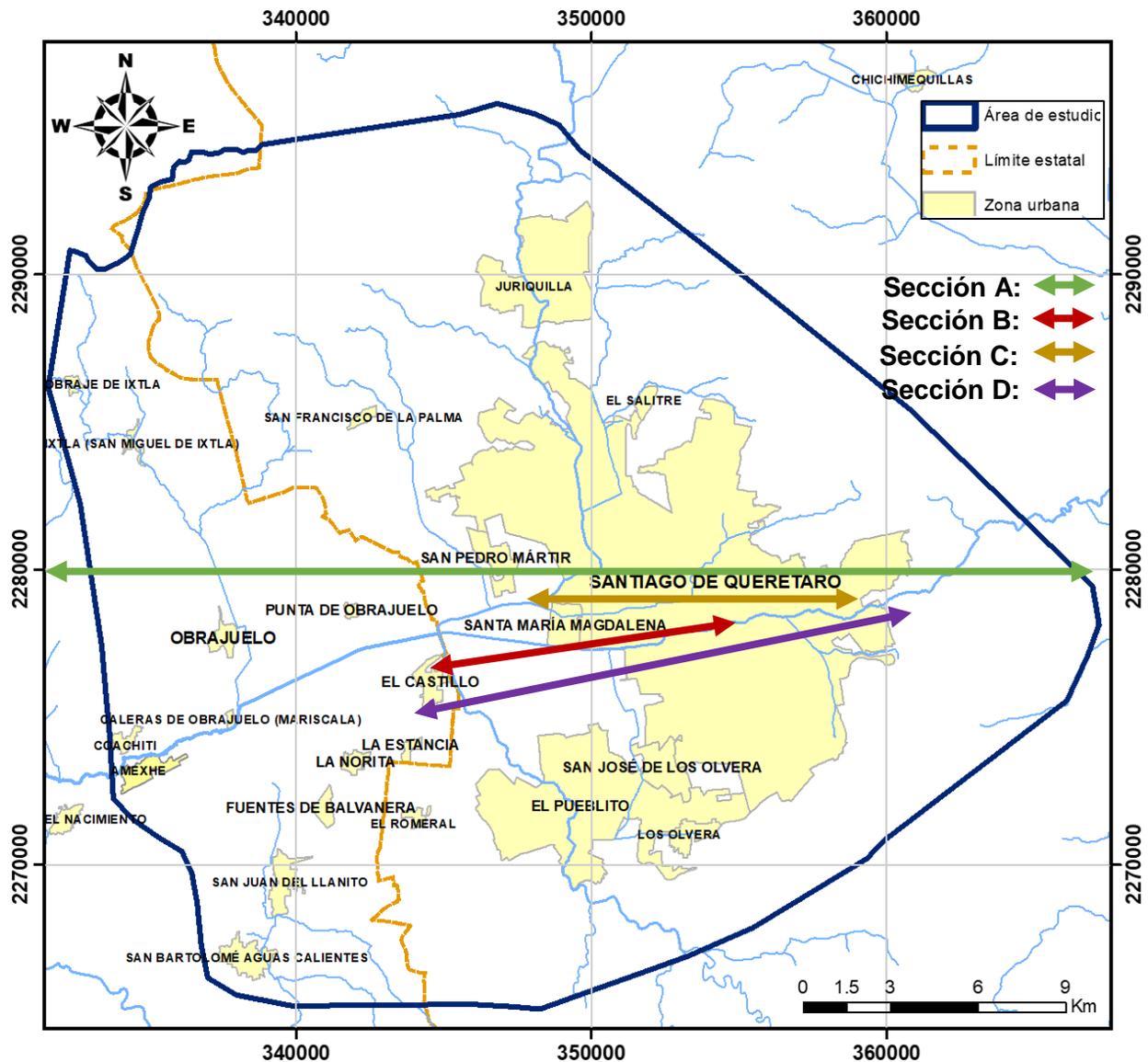


Figura 14. Mapa del área de estudio mostrando la ubicación de las secciones geológicas de los antecedentes históricos.

1.2.5 Isotopía

Carreón-Freyre *et al.* (2005) realizó un estudio isotópico del oxígeno 18 contra deuterio ($\delta^{18}\text{O}$ vs δD). Demostraron que el agua subterránea no proviene directamente de la infiltración y de la recarga vertical (Figura 15). En este trabajo menciona que el posible origen del agua subterránea se debe a la evaporación bajo las condiciones climáticas previas a la infiltración en aguas antiguas o por la mezcla de agua no meteóricas.

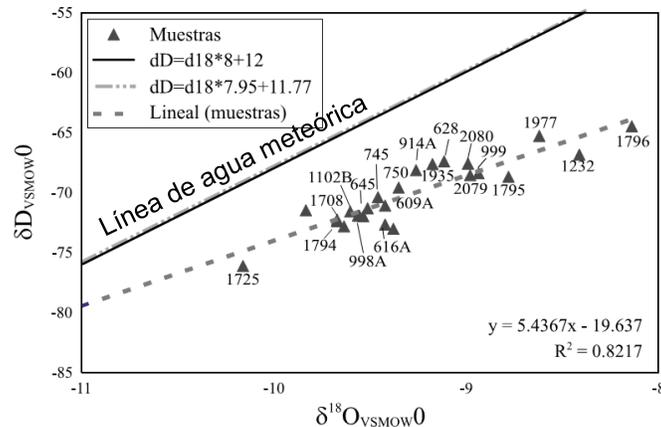


Figura 15. Gráfica de isotopos de $\delta^{18}\text{O}$ contra δD del agua subterránea (Fuente: Carreón-Freyre *et al.*, 2005).

Serrano (2007) en su investigación sobre la caracterización hidrogeoquímica e isotópica en el valle de Santiago de Querétaro, demostró que el agua subterránea no proviene de la precipitación. Y que las posibles causas se deben a la composición producida por la evaporación durante la recarga, efectos de altitud, paleoclimáticos y por infiltración preferencial de la precipitación durante la época del año. El comportamiento isotópico de las muestras de los pozos, demostró evidencias de fuentes hidrotermales (Figura 16).

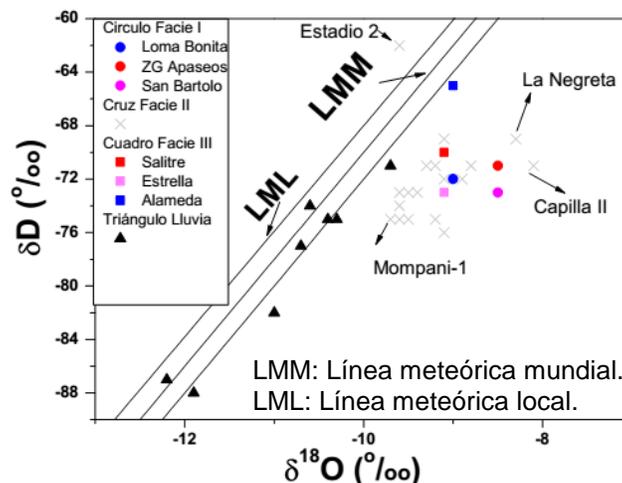


Figura 16. Gráfica de isotopos estables del agua subterránea de la ciudad de Santiago Querétaro comparadas con la línea meteórica mundial y local (Fuente: Serrano, 2007).

Suez-Lesser; CEAQ (2017) en su estudio hidrogeológico del acuífero del Valle de Querétaro determinó que el comportamiento isotópico del acuífero del valle de Querétaro presenta evidencias de zonas de recarga de agua meteórica para la zona norte y este del acuífero y zonas de evaporación para el área centro, norte, sur y este, como se observa en la Figura 17.

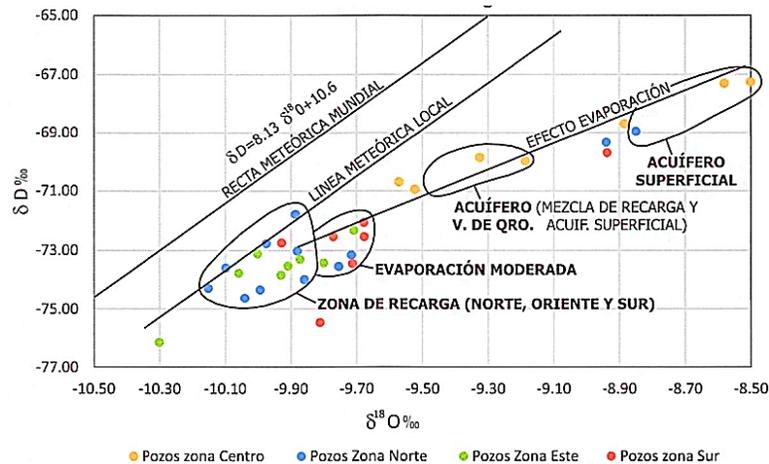


Figura 17. Gráfica de deuterio vs oxígeno 18 para el Valle de Querétaro (Fuente: Lesser, CEAQ, 2017).

Mejía *et al.*, (2018) realizó un estudio de las evidencias isotópicas e hidrogeoquímicas de flujos profundos en el acuífero de Obrajuelo, Guanajuato. Y determinaron que la composición isotópica del agua subterránea presenta un enriquecimiento de oxígeno 18, propio de flujos profundos o regionales y que han tenido contacto con rocas de altas temperaturas (Figura 18).

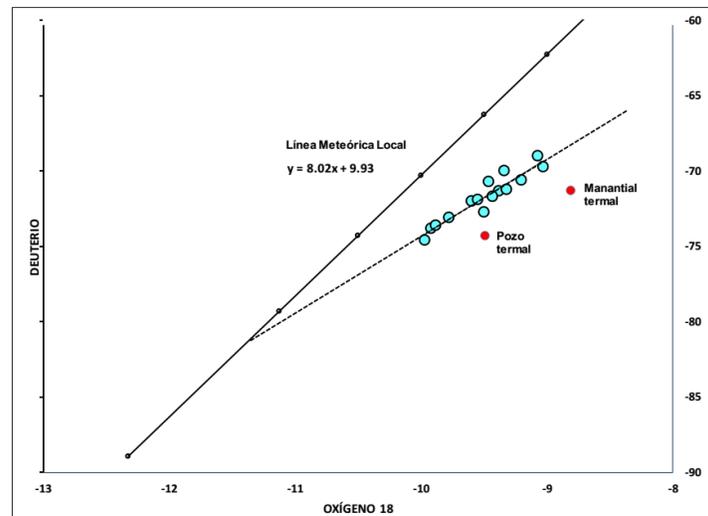


Figura 18. Composición isotópica del agua subterránea del Valle de Querétaro (Fuente: Mejía *et al.*, 2018).

1.3 Justificación

El continuo crecimiento poblacional, la actividad agrícola e industrial de la zona de Obrajuelo-Querétaro han estado ejerciendo presión sobre las aguas subterráneas, sin embargo, es la principal fuente de abastecimiento de la región. No obstante, desde el año de 2007, se han reportado concentraciones de nitratos, flúor, arsénico y plomo, por arriba de la norma NOM-127-SSA1-1994, agua para uso y consumo humano. Dichos elementos se encuentran asociados a zonas hidrotermales y provocado por las actividades antropogénicas.

Por lo tanto, resulta importante determinar la evolución, composición y dirección de los flujos del agua subterránea, para identificar los posibles agentes de contaminación, zonas de recarga, mezcla de aguas, los diferentes tipos flujo (local, intermedio y regional), disolución de minerales, entre otros procesos hidrogeoquímicos. Todo ello mediante la integración de datos hidrogeoquímicos, hidrodinámicos y geológicos en un modelo hidrogeológico conceptual, que comprende desde la localidad de Obrajuelo Gto., a la ciudad de Santiago Querétaro.

A partir de la problemática presentada anteriormente, surge la necesidad de realizar una evaluación hidrogeológica que permita entender el comportamiento de los sistemas de flujos del agua subterránea e integrar la información hidrogeoquímica, hidrodinámica y geológica en un modelo hidrogeológico conceptual, para simplificar de manera esquemática el acuífero y de esta manera tener una visualización de la zona y para proponer estrategias de mitigación a los problemas de contaminación y al manejo de los mantos acuíferos.

1.4 Hipótesis

Una vez establecido el planteamiento del problema de la investigación de la zona de Obrajuelo-Querétaro, se espera lo siguiente:

Con base en la información e integración de datos geológicos, hidrodinámicos e hidrogeoquímicos, la zona de estudio Obrajuelo-Querétaro se encuentra ubicada fisiográficamente en la Faja Volcánica Transmexicana asociada a zonas volcánicas e hidrotermales activas, por lo que se espera encontrar concentraciones significativas de flúor, arsénico, plomo, cadmio, entre otros metales pesados; estos componentes modificarán la composición y comportamiento de los sistemas de flujo subterráneo.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Evaluación hidrogeológica con base en la integración de datos geológicos, hidrodinámicos e hidrogeoquímicos para identificar las variables que determinan el comportamiento de los sistemas de flujo subterráneos de la zona de Obrajuelo-Querétaro.

1.5.2 Objetivos específicos

- ▶ Analizar y evaluar los niveles piezométricos y la dirección de flujo del agua subterránea mediante herramientas geoestadísticas.
- ▶ Evaluar los parámetros fisicoquímicos e hidrogeoquímicos de 21 muestras de agua de la zona de Obrajuelo-Querétaro, mediante herramientas hidrogeoquímicas y técnicas estadísticas.
- ▶ Determinar la calidad de 19 pozos de agua y un manantial termal, mediante el índice de calidad del agua canadiense utilizando como base la NOM-127-SSA1-1994 para uso y consumo humano.
- ▶ Establecer un modelo hidrogeológico conceptual integrando las variables más significativas, para determinar el comportamiento de los sistemas de flujo subterráneo de la zona de Obrajuelo-Querétaro.

CAPITULO II.

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se describe los fundamentos teóricos, definiciones y conceptos básicos que sustentarán a la presente investigación. Se presenta información resumida de las principales áreas a investigar: hidrología, hidrogeología, hidrodinámica e hidrogeoquímica. Estas bases teóricas darán sustento al estudio.

2.1 Hidrología

2.1.1 Ciclo hidrológico

Es un proceso descriptivo aplicable a la circulación general del agua en la tierra, que no tiene un principio o un fin. El cual, consiste en una sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la tierra y volver a la atmósfera. Este fenómeno se debe a dos causas: la primera es la radiación solar que proporciona la energía necesaria para elevar la temperatura del agua en los océanos, mareas y aguas continentales para su posterior evaporación hacia la atmósfera; la segunda causa es debido a la ley de la gravedad terrestre, hace que el agua condensada en la atmósfera descienda hacia la superficie de la tierra, originando los procesos de precipitación, escurrimiento, infiltración y evapotranspiración. El agua que se infiltra fluye a través de los diferentes tipos de material poroso del subsuelo hacia niveles donde el suelo se encuentra saturado y poder volver a surgir de manera natural como manantiales o como caudal base de los ríos. Al final el agua retorna a lagos o mares donde se evapora (Campos, 1998).

2.2 Hidrogeología

Aguas subterráneas: Es la parte de la precipitación que se filtra a través del suelo hasta llegar a las capas impermeables de la tierra o al material rocoso que está saturado de agua. La hidrogeología es la ciencia encargada de la distribución y el movimiento de aguas subterráneas (CONAGUA, 2016).

Hidrogeología: Actualmente se aceptan como términos adecuados como hidrología subterránea, hidrogeología o geohidrología. Por lo tanto, se encarga del estudio del almacenamiento, circulación, distribución, composición de las aguas en las zonas saturadas de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico, biológico y sus reacciones a la acción del hombre (Custodio y Llamas, 2001).

Acuífero

La palabra **acuífero** proviene del latín y está compuesta por dos palabras, **agua** que significa agua y **fero** que significan llevar, es decir, es una unidad geológica permeable saturada que puede transmitir cantidades significativas de agua (Custodio y Llamas, 1983; Freeze y Cherry, 1979).

Acuífero: Cualquier formación geológica, estrato, unidad o formación hidrogeológica permeable y capaz de almacenar, fluir y circular el agua por medio de sus poros, grietas, fallas o fracturas geológicas, que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo (Freeze y Cherry, 1979; Vélez, 1999; CONAGUA, 2016).

2.2.1 Tipos de acuíferos

La circulación del agua subterránea depende de la zona hidrogeológica por donde ésta se mueve y se distinguen las siguientes zonas:

- **Zona de aireación:** se caracteriza por la presencia de espacios vacíos que pueden estar ocupados por aire o agua. De acuerdo a la cercanía a la superficie del suelo se ha subdividido en zona de agua del suelo, zona intermedia y zona capilar. Su espesor depende del tipo de suelo y de la vegetación (Fagundo, 2005).
- **Zona saturada:** es la zona donde el agua subterránea llena todos los intersticios de las rocas, y mediante la porosidad se determina el contenido del agua por unidad de volumen. Parte del agua fluye de manera horizontal y vertical ya sea a otros acuíferos o hacia ríos, lagos o mares. Otra parte puede ser extraída por el hombre con fines de abasto mediante bombeo (Fagundo, 2005).

- **Zona de saturación y circulación profunda:** zona asociada a flujos profundos, y se caracteriza por presentar elevadas concentraciones de minerales y gases disueltos. Emergen al exterior a través de manantiales o pozos perforados por el hombre (Fagundo, 2005).

Los acuíferos se clasifican según las condiciones de presión y se describen a continuación: libres, confinados y semiconfinados.

- **Acuíferos libres:** son los que presentan una capa impermeable en la base y el nivel del agua subterránea se encuentra a presión atmosférica y se recarga directamente de las precipitaciones (Freeze y Cherry, 1979; Fagundo, 2005).
- **Acuíferos confinados:** son conocidos como artesianos, están delimitados por dos capas impermeables que no permite su recarga directa, sino a partir de una zona distante donde el material del acuífero queda expuesto a la infiltración de las precipitaciones. Otra característica, al perforar el pozo, el agua brota espontáneamente con un caudal constante, debido a que el agua se encuentra sometida a una elevada presión hidrostática a consecuencia del confinamiento (Freeze y Cherry, 1979; Fagundo, 2005).
- **Acuíferos semiconfinados:** tiene como límite superior una capa semipermeable llamada acuitardo y cuyo límite inferior puede ser una capa impermeable o semipermeable conocido como acuícludo. El agua es libre de moverse a través de los acuitardos en sentido vertical, hacia arriba o hacia abajo (Custodio E. y Llamas M., 1983; Martínez y Mejía 2000).

Otra manera de clasificar los acuíferos es mediante las características hidrogeológicas del acuífero en acuitardo y acuícludo.

- **Acuitardo:** es una unidad geológica permeable, que transmite agua en cantidades significativas. Contiene apreciables cantidades de agua y la transmiten muy lentamente, bajo ciertas condiciones permite una recarga vertical de otros acuíferos (Freeze y Cherry, 1979).
- **Acuícludo:** es una unidad geológica saturada de agua, pero incapaz de transmitir cantidades significativas de agua (Freeze y Cherry, 1979).

Clasificación según al tipo de porosidad o textura como: kárstica, fisurada y porosa.

- **Kárstica:** Son aquellas formaciones geológicas constituidas por rocas sedimentarias o susceptibles a generar procesos kársticos, generalmente calizas, dolomías, yesos y, en general rocas evaporíticas (Custodio y Llamas, 1983; Werner, 1996).
- **Fisurados o fracturados:** son aquellos acuíferos que circula a través de fallas, fisuras o grietas dentro de las formaciones de rocas ígneas (plutónicas o volcánicas), metamórficas y sedimentarias consolidadas (muy cementadas) (Custodio y Llamas, 1983; Werner, 1996).
- **Porosa:** Es una unidad acuífera constituida por materiales no consolidados, formada por sedimentos granulares como arenas, areniscas o gravas, en el cual, el agua ocupa los poros para su circulación o almacenamiento (Custodio y Llamas, 1983; Werner, 1996).

2.3 Hidrodinámica

2.3.1 Nivel del agua subterránea

Existen diferentes herramientas para efectuar los niveles del agua subterránea, utilizando una cinta de acero graduada, marcada con gis, sondas eléctricas, las cuales tienen un amperímetro, voltímetro o un foco, donde se activa una vez que la sonda entra en contacto con el agua. Los transductores de presión electrónicos se utilizan para medir los niveles del agua con una gran precisión (25 mm de tolerancia). Estos aparatos se conectan a una computadora para el registro de las mediciones (Martínez y Mejía, 2000).

A continuación, se describen los conceptos para determinar la dinámica de las aguas subterráneas.

- **Profundidad al Nivel Estático:** Es la distancia de la superficie del terreno hasta el nivel del agua subterránea. Se mide desde la altura del brocal (obra del pozo) hasta la profundidad del agua subterránea (Martínez y Mejía, 2000).
- **Elevación del Nivel Estático:** Es el nivel que se encuentra el agua subterránea referido a cierto nivel, comúnmente metros sobre el nivel del mar. Para determinar el nivel del agua subterránea con respecto al nivel del mar es necesario efectuar la elevación topográfica de la ubicación del pozo y restarle la distancia del nivel estático (Martínez y Mejía, 2000).

- **Gradiente Hidráulico:** Se define como la pérdida de energía experimentada por unidad de longitud recorrida por el agua, es decir, representa la pérdida o cambio de potencial hidráulico por unidad de longitud, medida en el sentido del flujo del agua. Permite establecer la dirección del flujo del agua subterránea (Freeze y Cherry, 1979).
- **Red de Flujo:** Los sistemas de flujo del agua subterránea se pueden representar en diferentes dimensiones por un conjunto de líneas ortogonales (perpendiculares entre sí) que se conocen como equipotenciales y líneas de flujo. Las redes de flujo son la superposición de líneas de flujo y líneas de carga hidráulica para ciertas condiciones de flujo, con la finalidad de representar la dirección e intensidad del flujo del agua en dos dimensiones (Martínez y Mejía, 2000).
- **Dirección del Flujo Subterráneo:** La determinación de la dirección del flujo permite establecer las zonas de recarga y descarga de los acuíferos, entre otras cosas. Para determinar la dirección del flujo del agua subterránea se requiere de la nivelación del brocal del pozo con respecto al nivel del mar (o algún otro nivel de referencia), distancia entre los pozos (cuando menos tres) y la medición de la carga hidráulica en los pozos (Martínez y Mejía, 2000).

2.3.2 Sistemas de flujo

De acuerdo a Tóth 1999, los sistemas de flujo dependen de la capacidad de interactuar con el medio ambiente y la distribución espacial del flujo. Ambas presentan variaciones tanto espaciales como temporales. El flujo subterráneo tiene tres tipos principales de interacciones entre aguas subterráneas y el medio ambiente, que se describen a continuación:

1. Interacción química, con los procesos de disolución, hidratación, hidrólisis, oxidación-reducción, ataque químico, precipitación, intercambio iónico, reducción de sulfatos, concentración, ultrafiltración y ósmosis;
2. Interacción física, con los procesos de lubricación y modificación de presiones e
3. Interacción cinética, con los procesos de transporte de agua, materia acuosa y no acuosa y calor. Dada por las características espaciales del flujo en cuencas sedimentarias se distribuyen de acuerdo a la geometría de los sistemas de flujo.

Los sistemas de flujo se distinguen por la profundidad del recorrido y sus características químicas, físicas y cinéticas. El contenido de elementos químicos en el agua subterránea dependerá del medio geológico y generalmente aumenta al ampliar la escala espacial y temporal. En la Figura 19, se observa una sección transversal de la distribución del flujo subterráneo, en el cual, se ubican las zonas de recarga, tránsito y descarga (Tóth, 1999).

A continuación, se describen los diferentes tipos de sistemas de flujo subterráneo:

- **Sistema de flujo local**, es aquel donde su zona de recarga y descarga se encuentran a corta distancia, el agua tiene una profundidad somera, baja salinidad, alto contenido de oxígeno disuelto, bajo pH, valor más positivo en Eh, una temperatura cercana a la del ambiente y puede variar cuando cambian las estaciones del año. La presencia del flujo local se limita a una cuenca (Tóth, 1962,1999).
- **Sistema de flujo intermedio**, su recorrido es más profundo que la de un flujo local, puede pasar el límite de descarga a una cuenca topográficamente más baja, incluyendo dentro de su extensión la presencia de varios flujos locales, el agua tiene mayor concentración de sales disueltas, menor contenido de oxígeno disuelto, mayor contenido de sólidos totales disueltos (STD), pH más alto, menor Eh con respecto al de un flujo local, una temperatura más elevada que la de un flujo local. Este sistema se diferencia con la de un flujo local porque presenta movimiento vertical descendente del agua con mayores gradientes hidráulicos, el flujo lateral se lleva a cabo a mayor profundidad y mayor distancia, el movimiento del agua vertical ascendente tiene mayor velocidad (Tóth, 1963,1999).
- **Sistema de flujo regional**, es el que circula a mayor profundidad a comparación de un flujo local e intermedio, iniciando en los terrenos de mayor altitud y finalizando en las zonas más bajas donde se descarga, por lo que se pueden encontrar varios sistemas de flujo local sobre éste y al menos uno de tipo intermedio. Las características químicas específicas del agua de este flujo incluyen un alto contenido en sales disueltas, bajo contenido de oxígeno disuelto, pH alto tendiendo a ser más alcalino, Eh negativo, alta temperatura (Tóth, 1963; 1999).

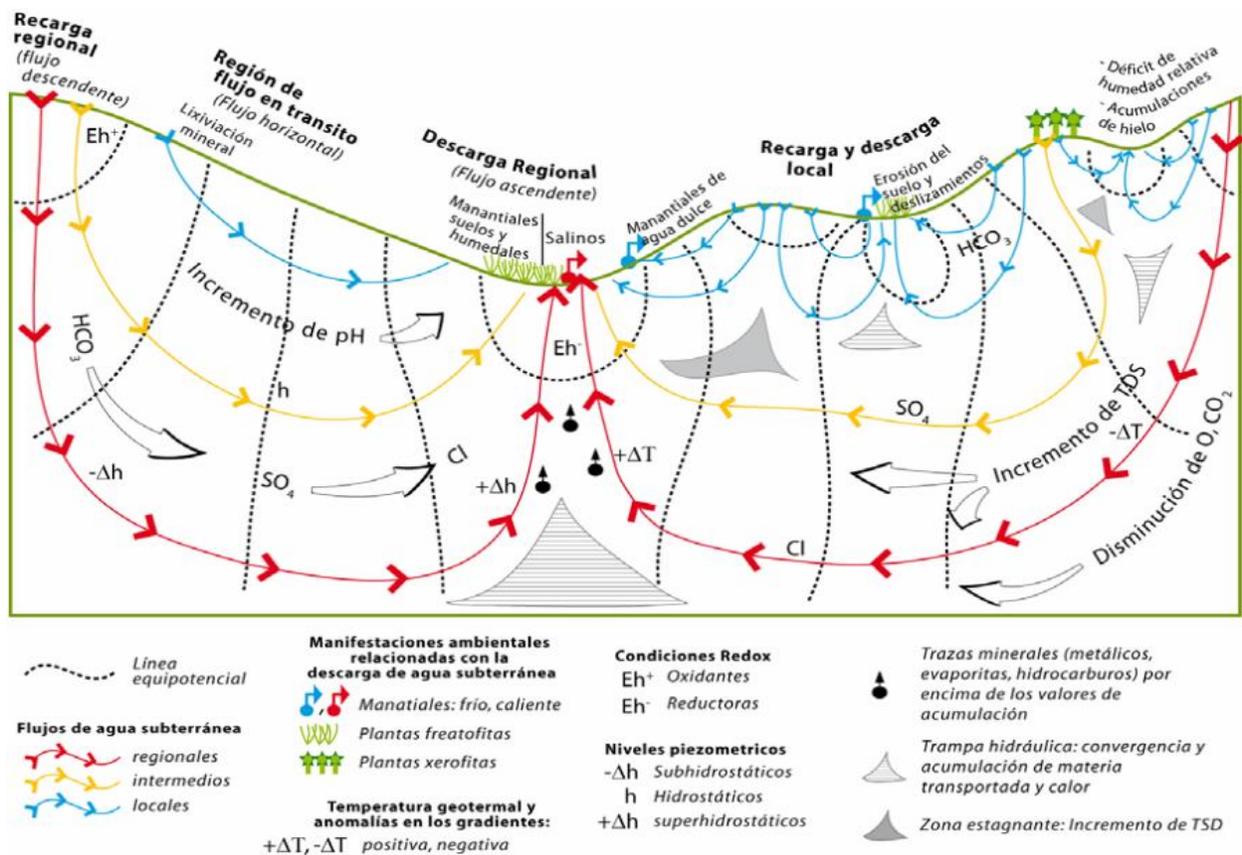


Figura 19. Esquema de los sistemas de flujo (Tóth, 1999; tomada de Peñuela–Arévalo, 2007).

Gradiente Geotérmico

La temperatura aumenta gradualmente con la profundidad a un ritmo conocido como gradiente geotérmico. El gradiente geotérmico varía considerablemente de un lugar a otro. En la corteza, las temperaturas aumentan, a una media de 20°C a 30°C por kilómetro (1°C / 33 metros) (Tarbuck y Lutgens, 2005).

2.4 Hidrogeoquímica

La **hidrogeoquímica** es la ciencia que estudia las características y el comportamiento geoquímico del agua subterránea y en sus interacciones entre las rocas de la corteza terrestre (Custodio, 1983).

Werner (1996), la define como la química de las aguas subterráneas que se ocupa de la calidad química del agua y que proporciona conocimiento sobre el origen, evolución y entender el funcionamiento de los sistemas de flujo subterráneos.

2.4.1 Características físico-químicas del agua subterránea.

La composición de las aguas subterráneas está definida por sus características físicoquímicas como: temperatura, pH, Eh, CE, oxígeno disuelto y SDT.

a) Temperatura

La temperatura del agua subterránea en zonas más superficiales, depende de las variaciones de la temperatura ambiente o por el régimen de flujo geotérmico (1°C cada 33 metros). Las fallas y fracturas pueden generar actividad hidrotermal, aumentando la temperatura del agua subterránea. La temperatura afecta alguna de las propiedades geoquímicas del agua subterránea (solubilidad de gases y minerales). Sus mediciones se determinan directamente en campo (Deutsch, 1997).

Según Bogomolov (1966), establece la siguiente clasificación como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de aguas subterráneas de acuerdo a la temperatura.

Muy frías	$t < 5^{\circ}\text{C}$
Frías	$5 < t \leq 10^{\circ}\text{C}$
Moderadamente frías	$10 < t \leq 18^{\circ}\text{C}$
Tibias	$18 < t \leq 25^{\circ}\text{C}$
Moderadamente tibias	$25 < t \leq 37^{\circ}\text{C}$
Calientes	$37 < t \leq 42^{\circ}\text{C}$
Muy caliente	$t > 42^{\circ}\text{C}$

Fuente: Custodio (1983).

Existe otra clasificación según Schoeller (1962), en el cual propone una clasificación de aguas de acuerdo a la temperatura como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de aguas subterráneas de acuerdo a la temperatura.

Aguas Hipertermales o termales	$t > t_m + 4^{\circ}\text{C}$
Aguas Ortotermales o normales	$t_m \leq t \leq t_m + 4^{\circ}\text{C}$
Aguas Hipotermales o frías	$t < t_m$

t = temperatura del agua
 t_m = temperatura media anual

b) Potencial de hidrógeno (pH).

El pH de una solución acuosa es una medida del número de iones de hidrógeno (H^+) o protones presentes. La definición de pH es el logaritmo negativo de la actividad de los iones de hidrógeno. El rango es de 0-14, 0 (más ácido) y 14 (más básico), y a 25°C un pH de 7 significa que la solución es neutra. El valor del pH va a depender para la disolución o no de los minerales presentes en la región y controlar las especies químicas en el agua y así como la presencia de metales traza. La medición se realiza en campo, en una celda de flujo continuo, de modo que el gas disuelto no se intercambie con la atmósfera antes de la medición. El pH de una solución puede modificarse a causa de la temperatura y especialmente a la cantidad de CO_2 disuelto (Fetter, 1993).

c) Potencial redox (Eh)

El potencial redox es un parámetro indicador de las condiciones electroquímicas en el sistema. Dependiendo del valor negativo o cercano a cero representa un ambiente reductor en el acuífero, mientras un valor positivo representa condiciones oxidantes. Esto con la finalidad de proporcionar información relacionada a las concentraciones de especies químicas en sistema acuoso.

Los sistemas redox están en relación directa con el pH, el oxígeno disuelto, la presión y la temperatura. Por ejemplo, el hierro se disuelve en las aguas subterráneas en los estados redox (valencia) Ferroso [Fe(II)] y Férrico [Fe(III)]. Mediante el Eh, es posible calcular a partir de una concentración de hierro disuelto total [Fe(II)+Fe(III)] la cantidad de hierro que está presente en las formas ferrosas y férricas, asumiendo el equilibrio redox. Muchos de los elementos disueltos en el agua subterránea ocurren en más de un estado redox como, por ejemplo: Mn, N, S, O y Cr (Deutsch, 1997).

d) Conductividad eléctrica (CE)

El agua subterránea se hace conductora debido al contenido de iones como partículas con cargas eléctricas. Por ello la conductividad eléctrica de una solución es proporcional a su concentración de iones. Por eso, la conductividad eléctrica es proporcional a la concentración de los sólidos disueltos totales (SDT). Las unidades de medición son pmhos/cm, mmhos/cm (o pSiemens/cm, mSiemens/cm). También, la conductividad eléctrica depende de la temperatura, esta aumenta un 2% por cada grado de temperatura. La conductividad en aguas subterráneas dulces puede variar entre 100 y 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Custodio y Llamas, 1983; Werner, 1996).

e) Oxígeno disuelto (OD)

El oxígeno se disuelve fácilmente en el agua en forma tal que éste se infiltra con las aguas de lluvia y alcanza a los acuíferos, durante su paso subterráneo tiene las capacidades de producir un medio oxidante y de solubilizar o insolubilizar iones, además juega un papel importante en la actividad de los microorganismos. El oxígeno puede ser consumido por sustancias oxidables, como la materia orgánica, Fe^{+2} , NH_4^+ , NO_2^+ , acción biológica, entre otros. El oxígeno disuelto depende de la presión, salinidad y la temperatura (al aumentar la temperatura disminuye su solubilidad). La edad del agua se asocia con la cantidad de oxígeno disuelto, conforme avanza el tiempo menos oxígeno tiene. En la mayoría de las aguas subterráneas las concentraciones de oxígeno disuelto están entre 0 y 5 partes por millón (Custodio y Llamas, 1983; Werner, 1996).

f) Sólidos disueltos totales (SDT)

Los sólidos disueltos totales en el agua consisten en la concentración de iones mayores que ocupan un 99%, los menores un 1% y los traza alrededor de 0.1%. La abundancia relativa de los elementos que componen a los sólidos disueltos en el agua subterránea depende de la movilidad química, esto debido a que conforme el agua subterránea se infiltra se van disolviendo los materiales que encuentra en su camino, y así, aumentando la cantidad de sólidos disueltos (Freeze y Cherry, 1979; Deutsch, 1997).

2.4.2 Composición química del agua subterránea

La composición química del agua subterránea está compuesta por la concentración de iones mayores, menores y constituyentes trazas. Estas concentraciones dependen de la disponibilidad de los elementos en el suelo y la roca a través del cual circula, por los procesos geoquímicos tales como solubilidad y absorción, por cinética de los procesos geoquímicos y por el contacto con los diferentes minerales que componen el material geológico a lo largo de los sistemas de flujo subterráneo. Cada día se vuelve más común, que las concentraciones de los componentes inorgánicos disueltos, estén influenciadas por las actividades del hombre. En algunos casos, la contribución por fuentes antropogénicas, puede causar que algunos elementos como se muestra en la Tabla 4, presenten niveles de concentración mayores sobre los rangos normales indicados en esta tabla. A partir de su composición química, se puede determinar la dirección del flujo del agua subterránea, incluyendo las concentraciones de algún elemento o contaminante (Freeze & Cherry 1979).

Tabla 4. Componentes más importantes encontrados en la presente investigación.

Elemento	Fuente u origen	Características
Aniones mayoritarios (> 5 mg/L)		
Bicarbonato (HCO₃⁻)	Se origina a partir del bióxido de carbono (CO ₂) de la atmósfera y el aporte profundo de emanaciones volcánicas. El CO ₂ se mezcla con el agua de lluvia dando origen al ácido carbónico (H ₂ CO ₃) e interperiza a rocas calizas, dolomías y carbonatadas arcillosas. Dando origen a acuíferos bicarbonatados.	La disolución de CaCO ₃ (MgCO ₃) exige la presencia de ácido de carbono libre (CO ₂). Presenta un riesgo de alcalinizar el suelo en áreas de riego.
Cloruros (Cl⁻)	Proviene de suelos de origen marino, agua de lluvia, mezcla de agua marina, por la interacción de rocas (evaporitas y basaltos) y minerales (sodalita, apatita, mica, hornblenda, vidrios volcánicos), puede tener origen de vertidos urbanos e industriales.	El ión no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni reduce en aguas naturales, tampoco es adsorbido ni formar parte de los procesos bioquímicos y se considera un buen trazador. La NOM-127-SSA1-1994 establece un límite permisible de 250 mg/L para agua potable.
Sulfatos (SO₄²⁻)	Se originan por la presencia de minerales (pirita) aportados por emanaciones volcánicas, por rocas evaporíticas (yeso, anhidrita) y por agua de lluvia.	Los sulfatos se disuelven fácilmente con excepción del sulfato de bario. La NOM-127-SSA1-1994 establece un límite permisible de 400 mg/L para agua potable.
Nitratos (NO₃⁻)	Por lo general, el nitrato tiene un origen orgánico (descomposición de proteínas, oxidación de la proteína en amoníaco-nitrito-nitrato). Pero también, se presentan debido a rocas ígneas, en pequeñas cantidades de amoníaco NH ₃ o de nitrato soluble en la roca.	El nitrato es altamente soluble que se moviliza en el agua subterránea únicamente a través de la actividad orgánica o mediante la evaporación. La concentración permisibles para agua potable de acuerdo a NOM-127-SSA1-1994 es de 10 mg/L.

Cationes mayoritarios (> 5 mg/L)		
Calcio (Ca²⁺)	Se origina a partir de minerales (calcita, plagioclasas, piroxenos, anfíboles, apatita y yeso) y especialmente de rocas básicas, calizas, dolomías y anhidritas.	Se encuentra frecuentemente en estado de saturación y su estabilidad en solución depende del equilibrio CO ₂ , HCO ₃ ⁻ y CO ₃ ²⁻ . Se precipita con facilidad y es muy afectado por el cambio iónico.
Magnesio (Mg²⁺)	Se debe a la disolución de minerales de rocas cristalinas (olivino, biotita piroxenos, anfíboles, silicatos magnésicos y ferromagnésicos) y especialmente en rocas básicas, evaporitas. También puede tener un origen de mezcla con agua de mar, contaminación industrial y minera.	Se disuelve más lento, pero es más soluble que el calcio, y tiende a permanecer en solución cuando este se precipita. Es afectado por el cambio iónico. La concentración de Mg ²⁺ en aguas subterráneas es menor que la del calcio; y por lo general, presenta una concentración de 1 a 40 mg/L y en acuíferos de rocas ricas en Mg hasta 100 mg/L.
Sodio (Na⁺)	El sodio procede de la desintegración de minerales de feldespatos, feldespatoides, halita y otros silicatos; y de rocas de origen marino. También se originan del cambio de bases de arcillas del mismo origen, intrusiones de agua de mar y agua de lluvia. Y raras veces por contaminación urbana e industrial.	Es el catión más abundante en el agua de mar y es muy soluble. Es afectado por el cambio de bases. Usualmente es el catión dominante en aguas geotermales de alta temperatura. La NOM-127-SSA1-1994 establece un límite permisible de 200 mg/L para agua potable.
Elementos minoritarios (0.01 – 1.0 mg/L)		
Boro (B)	Su origen es de aguas termales y puede proceder de algunos minerales como la turmalina. También puede tener un origen por la utilización de determinados fertilizantes. En aguas subterráneas se encuentra disuelto como H ₃ BO ₄ (ácido bórico) Es un buen trazador para aguas usadas y aguas lixiviadas de basureros, ya que el boro se encuentra en muchos detergentes.	El ácido bórico es muy débil y se disuelve fácilmente en agua caliente (aguas termales). Concentraciones altas afectan a la salud, que de acuerdo a la OMS el límite máximo permisible para uso y consumo humano es de 0.5 mg/L. Las concentraciones normales van de los 0.01 - 1.0 mg/L. En aguas termales de ambientes volcánicos y en salmueras de yacimientos de hidrocarburos se encuentran concentraciones elevadas de 10 - 100 mg/L.

<p>Fluoruro (F⁻)</p>	<p>Procede del mineral fluorita (CaF₂) y generalmente de aguas termales o ambientes volcánicos.</p>	<p>Presenta una solubilidad baja, por lo que las concentraciones en aguas subterráneas es reducida, pero si rebasa los límites permisibles de la NOM-127-SSA1-1994 que establece un límite de 1.5 mg/L para agua potable, podría afectar a la salud (huesos y dientes).</p>
<p>Litio (Li⁺)</p>	<p>Es un elemento poco abundante en la corteza terrestre, pero se encuentra en aguas termales de origen volcánico.</p>	<p>Es soluble y tiende a permanecer en disolución. Sus concentraciones normales son 0.001 – 0.5 mg/L, llegando hasta 5 mg/L en salmueras.</p>
<p>Potasio (K⁺)</p>	<p>Proviene de minerales como la ortoclasa, biotita, leucita y de rocas cristalinas y suelos arcillosos. Sin embargo, puede tener origen de actividades agrícolas (uso de fertilizantes), o por actividades industriales.</p>	<p>Presenta una alta solubilidad y fijación en la estructura de las arcillas. La concentración natural en aguas subterráneas es menos de 10 mg/L.</p>
<p>Estroncio (Sr²⁺)</p>	<p>Procede principalmente de minerales como la celestita, (SrSO₄), y la estroncianita, (SrCO₃).</p>	<p>Pueden ser insoluble o soluble en agua, de acuerdo a las reacciones químicas. Los compuestos solubles en agua constituyen una amenaza para la salud humana. La concentración natural está limitada por el efecto del intercambio iónico con las arcillas ricas en calcio y contribuye a la dureza del agua.</p>
<p>Hierro (Fe)</p>	<p>Procede de la desintegración de minerales de silicatos ferríferos, sulfuros, óxidos de hierro y de rocas sedimentarias.</p>	<p>Su estabilidad depende del potencial redox; se solubiliza y precipita con facilidad. En medios oxidantes solo se tiene cantidades mínimas de Fe disuelto. Afecta la potabilidad, lo cual, la NOM-127-SSA1-1994 establece un límite de 0.3 mg/L. Produce manchas, incrustaciones y precipitados. El agua se vuelve amarillenta cuando se oxida.</p>

Elementos traza (< 0.1 mg/L)		
Aluminio (Al³⁺)	El aluminio se encuentra en rocas ígneas, que contienen aluminio en forma de minerales de alúminosilicato. Cuando estos minerales se disuelven, según las condiciones químicas, es posible precipitar el aluminio en forma de arcillas u hidróxidos de aluminio o ambos.	Es un elemento muy abundante pero poco móvil. Es difícil de poner en solución, y queda retenido por las arcillas. El límite máximo permisible para uso y consumo humano es de 0.02 mg/L.
Arsénico (As)	Proceden principalmente de minerales como arsenopirita (FeAsS); y otros arseniuros metálicos como la löllingita (FeAs ₂), nicolita (NiAs), cobalto brillante (CoAsS) y esmatita (CoAs ₂). Y puede tener un origen de los agroquímicos.	Afecta la salud y el límite máximo permisible para uso y consumo humano es de 0.025 mg/L.
Cadmio	Se encuentra en la naturaleza por afinidad química asociado a metales como el zinc, plomo y cobre. Puede tener origen industrial y por causa de fertilizantes.	Es un metal tóxico para la salud humana y el límite máximo permisible para uso y consumo humano es de 0.005 mg/L.
Plomo (Pb²⁺)	El plomo por lo general, se encuentra en los sulfuros y el mineral más común es la galeana. Sin embargo, puede tener un origen antropogénico de zonas industriales.	Es un elemento fuertemente dañino para la salud humana. El límite máximo permisible para uso y consumo humano es de 0.01 mg/L.
Manganeso (Mn²⁺)	Es similar al hierro, se da por la disolución de minerales de manganeso en ambientes ácidos y reductores.	Afecta la potabilidad del agua, por lo cual, produce manchas negras y precipitados. El límite máximo permisible para uso y consumo humano es de 0.15 mg/L.

Fuente: elaborado con base a Custodio y Llamas, 1983; Hem, 1985; Werner, 1996; Pinto, 2009; Fernández, 2009.

2.4.3 Relaciones iónicas

Las relaciones iónicas ayudan en la caracterización de las aguas naturales, a identificar los diferentes tipos de agua y la evolución en la composición hidrogeoquímica del agua subterránea en su trayecto. Estas relaciones se expresan en miliequivalente por litro (meq/L) y van precedidas de la letra r, que significa relación, las cuales reflejan las diferentes propiedades de interacción con el medio (Custodio y Llamas, 1983; Fagundo, 2005).

Las principales relaciones utilizadas para esta investigación se muestran en la siguiente Tabla 5.

Tabla 5. Índices hidrogeoquímicos.

Relación	Características
$\frac{CE}{SDT}$	Los componentes disueltos causan aumento en la conductividad eléctrica.
$r \frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+}}$	Indican la posible influencia de terrenos dolomíticos o terrenos ricos en silicatos magnésicos como los gabros y basaltos. Si hay una pérdida de magnesio significa cambio de magnesio por sodio.
$r \frac{Na^+}{Ca^{2+}}$	Relación entre la calcita y la halita u otras fuentes de Na ⁺ . Si asciende induce en el posible intercambio de calcio por sodio o descendente si el intercambio es de sodio por calcio, esto dependiendo de la litología del área de estudio
$r \frac{Na^+}{Ca^+ + Mg}$	Es una relación de alcalinos y alcalinotérreos que indican variaciones litológicas bruscas o la presencia de fracturas o fallas profundas que conectan litologías diferentes y que dividen el acuífero.
$r \frac{SO_4^{2-}}{Cl^-}$	Indican concentraciones de sales en el acuífero. Si existe proceso de reducción de sulfatos su concentración disminuirá.
$r \frac{Cl^-}{HCO_3}$	Determina problemas de intrusión marina e indica el avance del proceso de concentración de sales y el tiempo de residencia del acuífero.
$r \frac{Na^+}{Cl}$	Caracteriza el cambio de bases (desequilibrio entre iones de cloro y alcalinos), ya que en el mismo no se altera el contenido en cloruros.
$r \frac{CE}{NO_3^-}$	La correlación entre la conductividad y el incremento del ion NO ₃ ⁻ es un buen indicador del grado de contaminación del acuífero.
$r \frac{Li}{B}$	Indica terrenos de termalismo.

Fuente: elaborado con base a Custodio y Llamas, 1983; Fernández, 2009.

2.4.4 Procesos hidrogeoquímicos que determinan la composición del agua subterránea.

Mediante los datos hidrogeoquímicos podemos obtener información de los procesos mineralógicos presentes en el transporte de las aguas subterráneas. En este apartado se describen los procesos más importantes que controlan la composición del agua subterránea que son: disolución y precipitación, reacciones de oxidación-reducción, intercambio iónico, adsorción.

La Figura 20, se muestra esquemáticamente los procesos hidrogeoquímicos más significativos en un sistema acuoso y en la interfaz agua-sólido.

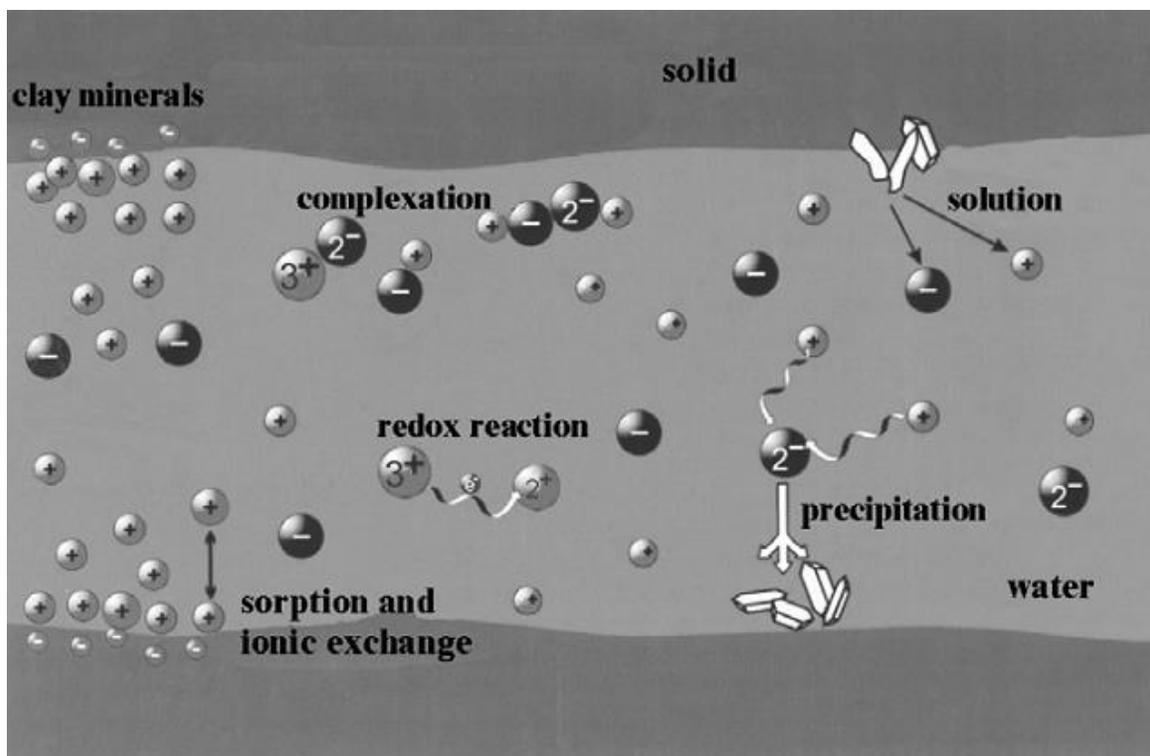


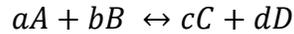
Figura 20. Procesos de interacción en un sistema acuoso (Fuente: Merkel y Planer 2005).

a) Disolución- precipitación

En la hidrogeoquímica, la disolución de sustancias sólidas en el agua subterránea es un proceso muy importante, conocido también como la mineralización del agua subterránea. La solubilidad del mineral o cantidad de sustancias disueltas depende de las siguientes variables: temperatura del agua, solubilidad de los minerales, tiempo del contacto entre agua y roca, superficie del contacto, concentración de sustancias ya disueltas, pH y potencial redox (Eh).

Sin embargo, la disolución o la precipitación de un mineral a partir de una solución saturada se rige bajo la “ley de acción de masas” que se define con la siguiente Ecuación 1: (Werner, 1996; Fagundo, 2005; Appelo y Postma, 2005).

Ecuación 1



El valor de la constante de equilibrio, viene dada en función de la actividad de reactivos y productos, Ecuación 2:

Ecuación 2

$$K = \frac{a_C^c}{a_A^a} + \frac{a_D^d}{a_B^b} +$$

Dónde:

K: es la constante termodinámica de equilibrio, también denominada como constante de estabilidad, constante de disociación (reacciones de disociación química); así como constante del producto de solubilidad (reacciones de disolución).

a: actividad química.

A y B: compuestos reaccionantes.

C y D: productos de la reacción.

a, b, c y d: número de moles

En una disolución, cuando los productos de una reacción sean todas especies iónicas, se dice que la disolución es congruente (Fagundo, 2005).

Ejemplo:

Mineral	Reacción
Halita	$\text{NaCl} = \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$
Calcita	$\text{CaCO}_3 = \text{Ca}^{2+} (\text{Ca}) + \text{CO}_3^{2-}$
Anhidrita	$\text{CaSO}_4 = \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$

(Fuente: Fagundo, 2005).

Por el contrario, cuando la disolución de un mineral da lugar a especies iónicas y moléculas no solubles, se dice que la disolución es incongruente. Este último es el caso de los aluminosilicatos (Fagundo, 2005).

Ejemplo:

Mineral	Reacción
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_2)_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2(\text{CO}_3)$

(Fuente: Fagundo, 2005).

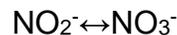
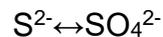
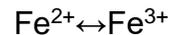
b) Procesos de óxido-reducción

El proceso de oxidación y reducción se define de la siguiente manera:

Oxidación: Es la combinación con el oxígeno o la pérdida de hidrógeno, lo que es equivalente a la pérdida de electrones o al aumento de escalón de valencia.

Reducción: Es la combinación del hidrógeno o pérdida de oxígeno, lo que es equivalente a la ganancia de electrones o a la disminución de escalón de valencia (Werner, 1996).

Ejemplos:



La oxidación corre de izquierda a derecha y la reducción de derecha a izquierda. La oxidación, así como la reducción puede recorrer varios escalones, por ejemplo, en la serie de reducción de nitrato:



La serie de reducción se observa en la infiltración de aguas de rellenos sanitarios con alta concentración de materia orgánica en el agua subterránea, con lo que se elimina el nitrato. Las condiciones de oxidación en las aguas subterráneas ocurren por oxígeno excedente. Las condiciones de reducción ocurren por falta de oxígeno o por sustancias orgánicas excedentes. En acuíferos profundos presentan concentraciones bajas de oxígeno debido a que se producen los procesos de oxidación en zonas más cercanas a la superficie. Por ello, las aguas subterráneas más profundas normalmente están reducidas (Werner, 1996).

c) Sorción-Desorción

Adsorción y absorción

La interacción de los acuíferos y el subsuelo contienen materiales como minerales arcillosos, materia orgánica y óxidos hidróxidos metálicos que pueden absorber sustancias químicas. Los diversos procesos indicados por el término general sorción se ilustran en la Figura 21. La adsorción se refiere a la adherencia de un químico a la superficie del sólido, la absorción sugiere que el químico se absorbe en el sólido, y el intercambio iónico implica el reemplazo de un químico por otro en la superficie sólida (Appelo y Postma, 2005).

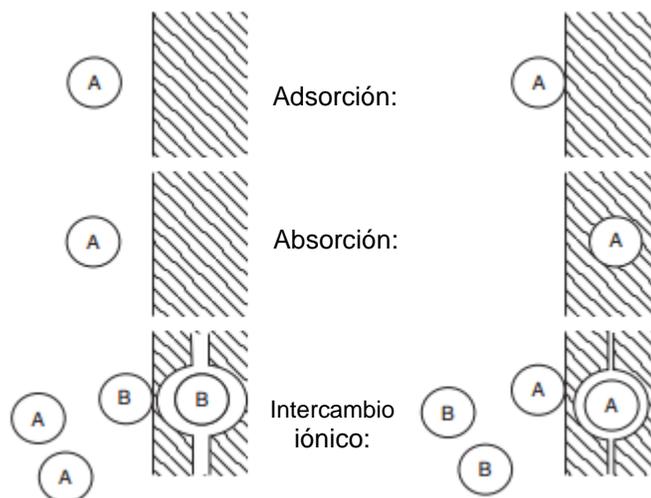
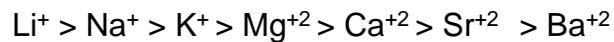


Figura 21. Proceso de adsorción y absorción (Tomada de Appelo y Postma, 2005).

Intercambio iónico

El agua subterránea entra en contacto con una variedad de suelos, rocas y minerales, que disponen a intercambiar algunos de sus propios cationes o cargas eléctricas por algunos que se encuentren en el agua. Estas fuerzas eléctricas pueden absorber los dipolos del agua, así como a los cationes. El intercambio catiónico es un proceso bastante común para aguas que entran en contacto con suelo arcillosos y/o rocas arcillosas, especialmente la montmorillonita. En general, el tipo de intercambio producido depende del tipo de arcilla. Por ejemplo, para arcillas sódicas, se produce el intercambio selectivo entre Ca^{+2} y Mg^{+2} por Na^{+} ; para arcillas cálcicas, se produce el intercambio de Mg^{+2} y Na^{+} por Ca^{+2} (Werner, 1996).

El cambio de bases afecta principalmente a los cationes más frecuentes en el agua subterránea y forman la serie de facilidad de intercambio catiónico siguiente:



Por su adherencia más fuerte, los cationes más a la derecha de esta serie desplazan a aquéllos más a la izquierda. El intercambio catiónico más importante en la hidrogeoquímica es el sodio (Na^+) por el calcio (Ca^{+2}) (Custodio y Llamas, 1983; Werner, 1996).

2.4.5 Modelación hidrogeoquímica

La modelación hidrogeoquímica son representaciones de la dinámica química que operan en la interacción de agua roca. El objetivo de la modelación es diseñar un modelo teórico matemático capaz de explicar lo observado en el agua y las rocas para posteriormente realizar simulaciones o escenarios futuros. Utiliza datos del sistema, mineralogía, datos isotópicos, físico-químicos, entre otros, para determinar las reacciones químicas, condiciones del sistema (abierto o cerrado, en equilibrio o desequilibrio, temperatura constante o variable, y otras) y la variación de la composición química del agua con respecto a procesos naturales o antropogénicos (Fagundo, 2005).

De acuerdo a Fagundo (2005), los modelos se aplican de dos maneras:

- **Modelación directa (o simulación)**, predice la composición del agua y la transferencia de masa que pueden resultar de reacciones químicas hipotéticas. Ésta tiende a ser genérica en su naturaleza y fue desarrollada para responder a cuestiones hipotéticas como: cuales son las consecuencias termodinámicas y cinéticas si una roca A reacciona con un fluido B, bajo unas condiciones experimentales C. Las condiciones están restringidas por el modelista.
- **Modelación inversa (o aproximación de balance de masa)**, define la transferencia de masa a partir datos químicos, isotópicos y mineralógicos observados. Fue desarrollada como un modelo determinista para la interpretación de la composición química del agua subterránea e identificar de forma cuantitativa las reacciones geoquímicas que dan origen a dicha composición.

Los modelos consisten en un arreglo de ecuaciones de balance de masa para cada elemento, ecuaciones derivadas de la ley de acción de masas y sus constantes de equilibrio para la formación de complejos y ecuaciones que definen coeficientes de actividad de iones individuales (Fagundo, 2005).

Existe una variedad de modelos hidrogeoquímicos que se agrupan en cuatro grupos (Fagundo, 2005):

- I. Modelos de especiación: Calculan las especies acuosas y determinan el estado de saturación de las soluciones.
- II. Modelos de balance de masa: Calculan reacciones a lo largo de un camino de flujo.
- III. Modelos de transferencia de masa: Similares a los modelos de especiación, pero también calcula la transferencia de masa entre fases.
- IV. Códigos de transporte de masas químicas. Modelos de transporte de masas acoplados con los flujos hidrodinámicos advectivos y dispersivos.

2.4.5.1 Índice de saturación

El logaritmo del cociente del producto de actividad iónica (IAP) y la constante de producto de solubilidad (Kps) se denomina índice de saturación (SI). El IAP se calcula a partir de las concentraciones determinadas analíticamente considerando la fuerza iónica, la temperatura y la formación de complejos. El producto de solubilidad se deriva de manera similar a la IAP, pero utilizando datos de solubilidad en equilibrio corregidos a la temperatura del agua apropiada (Merkel y Planer 2005). Su expresión matemática es la siguiente:

Ecuación 3

$$SI = \log \frac{IAP}{K_{sp}}$$

Donde:

IS es el índice de saturación.

IAP es el producto de actividad iónica.

Kps es la constante de solubilidad a una temperatura y presión específica.

El índice de saturación SI indica, si una solución está en equilibrio con una fase sólida o si está sub-saturada y supersaturada en relación con una fase sólida, respectivamente. Un valor de 1 significa una sobresaturación diez veces mayor, un valor de -2 de insaturación cien veces en relación con una cierta fase mineral. En la práctica, el equilibrio se puede asumir para un rango de -0.2 a 0.2. Si el valor de SI determinado es inferior a -0.2, se entiende que la solución no está saturada en relación con el mineral correspondiente, si SI excede de +0.2, se supone que el agua está sobresaturada con respecto a este mineral (Merkel y Planer 2005).

2.5 Modelo hidrogeológico

Los modelos hidrogeológicos pueden ser representaciones físicas o numéricas de un sistema hidrogeológico real. Permiten observar a escala el comportamiento hidrogeológico de un acuífero, la cual se fundamenta con información proveniente del campo y laboratorio. La relación directa entre la información proveniente de estas fuentes y modelos asistidos por ordenadores, se basan en sus características espaciales definiendo un grupo de geodatos del área objeto de interés (Córdoba *et al.*, 2012).

2.5.1 Modelo hidrogeológico conceptual

Un modelo conceptual es una representación gráfica del sistema de flujo del agua subterránea que se realiza incorporando toda la información hidrogeológica disponible en un simple esquema conceptual (Anderson y Woessner, 1992).

Un modelo conceptual es un ambiente hidrogeológico integrado por aspectos morfológicos, geológicos y climáticos que determinan las características principales de un sistema de flujos subterráneos de un área determinada. Los seis parámetros principales que definen un régimen de agua subterránea son: el contenido de agua en las rocas, la geometría de los sistemas de flujo, la descarga específica, la composición química del agua, la temperatura y la variación temporal de todos los anteriores (Tóth, 1999; 2000).

2.5.2 Modelo hidrogeológico matemático

Un modelo numérico es una simplificación de un sistema real y de los procesos que ocurren en él, usado generalmente para simular una respuesta ante cierto estímulo. Actualmente los modelos cuentan con tecnología de cómputo e instrumentación que permiten reducir la incertidumbre en la representación que se hace del sistema real (Bear y Cheng, 2010).

De acuerdo a Bear y Cheng (2010), las predicciones se pueden usar para:

1. simular el comportamiento del sistema ante la implementación de políticas de gestión
2. obtener un mejor conocimiento del sistema y sus propiedades,
3. obtener información necesaria para evaluar regulaciones y
4. diseñar redes de monitoreo o experimentos de campo

Los modelos matemáticos son los más utilizados en la actualidad ya que son los que utilizan métodos numéricos para resolver la ecuación diferencial del movimiento del agua subterránea. Son más efectivos para predecir el comportamiento de los diversos sistemas subterráneos (Leyva, 2010).

2.5.3 Aplicación de los Modelos hidrogeológicos

Los modelos pueden ser utilizados para predecir las consecuencias de una acción propuesta o en un sentido interpretativo para conocer las variables que controlan la dinámica de un sitio específico. Por lo tanto, los modelos son utilizados, para determinar las características de los límites del acuífero y realizar evaluaciones de la recarga y descarga del acuífero (Leyva, 2010).

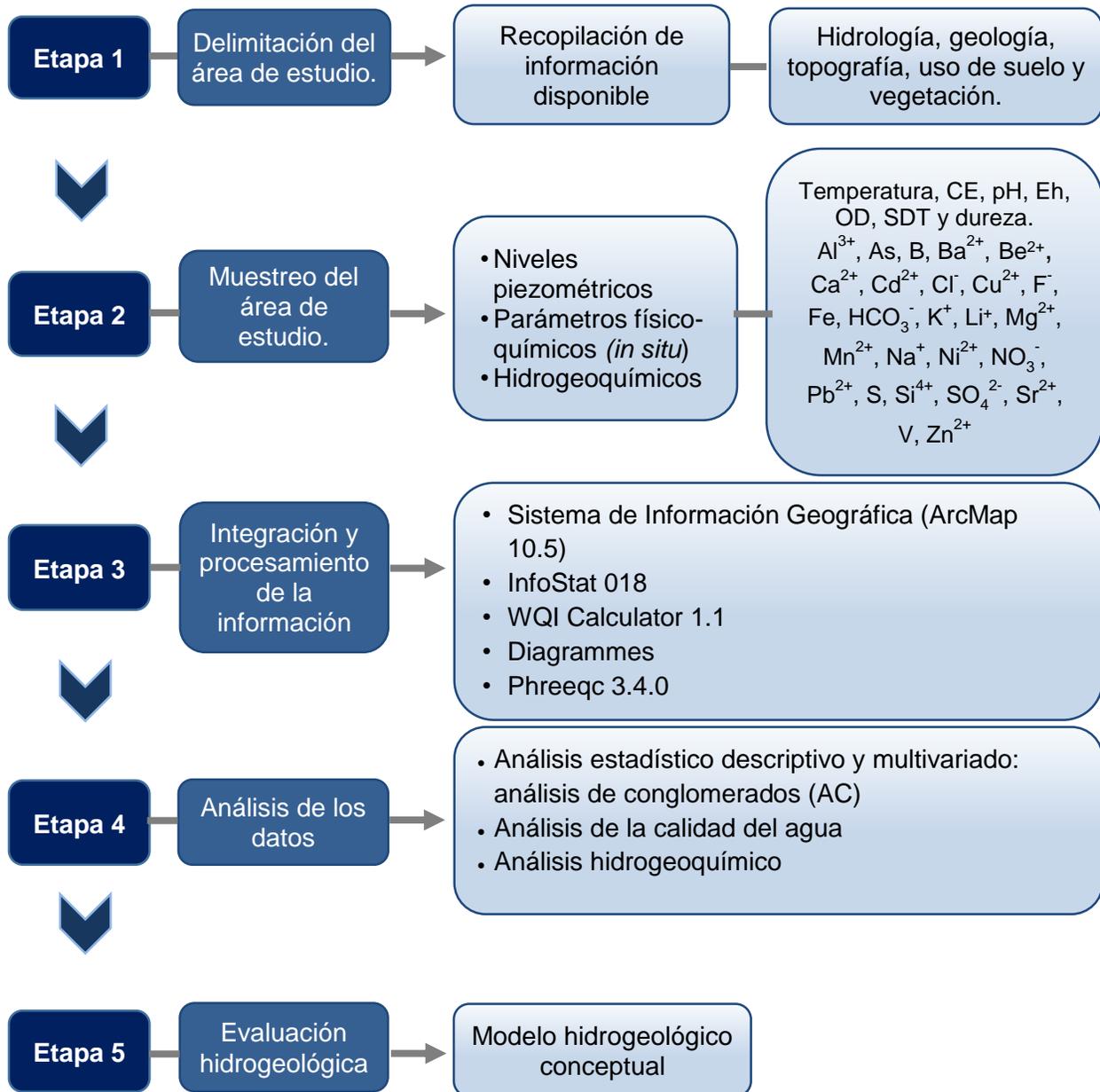
Leyva (2010), menciona tres tipos de aplicaciones del modelo:

- 1) Predictivo: se utiliza para predecir el futuro; requiere de calibración.
- 2) Interpretativo: se utiliza para el estudio de la dinámica del sistema y/o la organización de los datos de campo; no necesariamente se requiere de calibración.
- 3) Genérico: se utiliza para analizar el flujo en un sistema hidrogeológico hipotético, puede ser útil para establecer directrices reguladoras para una región específica, no necesariamente requiere de calibración.

CAPITULO III.

3. MÉTODOS Y MATERIALES

Para el desarrollo de la investigación se plantea la siguiente metodología:



Fuente: elaboración propia.

Para alcanzar los objetivos antes mencionados y comprobar la hipótesis propuesta en la presente investigación, se llevaron a cabo las siguientes actividades que describen los métodos, técnicas e instrumentos a utilizar en el proceso de la investigación.

3.1 Delimitación del área de estudio

Se recopiló toda información útil y necesaria que definió la situación histórica hasta la actual del área de estudio. Para el contexto hidrológico, se recopiló toda la información disponible con la finalidad de describir brevemente la red hidrográfica de la zona, los principales escurrimientos, entre otras características a nivel cuenca y subcuenca. Se analizaron los datos históricos de la calidad del agua subterránea como los parámetros físico-químicos e hidrogeoquímicos y así también los niveles piezométricos. Por otra parte, se recopiló y describió la información espacial disponible relacionada al clima, vegetación, suelo, topografía y geología del área de estudio. La información se obtuvo de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Universidad Autónoma de México (UNAM), Instituto Nacional de Estadísticas (INEGI), Servicio Geológico Mexicano (SGM) y del Gobierno del Estado e inclusive del Municipio de Obrajuelo, así como en diversos bancos de información consultados a través del Internet.

3.2 Medición del nivel piezométrico

En la etapa de muestreo se realizó la medición del nivel piezométrico de 30 pozos distribuidos en la ciudad de Querétaro y de la localidad de Obrajuelo, Guanajuato (Tabla 6). Los pozos fueron seleccionados de acuerdo a la accesibilidad y permisos. Esto con la finalidad de generar mapas piezométricos y compararlo con estudios precedentes. Se utilizó un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) marca GARMIN, empleando el sistema de coordenadas geográficas WGS 84 son las siglas en inglés de World Geodetic System 84 (que significa Sistema Geodésico Mundial 1984).

Tabla 6. Ubicación de los 30 pozos monitoreados.

No. de Pozo	Fecha	Coordenadas (UTM)		Nivel Piezométrico (msnm)
		x	y	
1	oct-17	343449	2271929	1663
2	oct-17	344440	2279792	1660
3	oct-17	344744	2278574	1669
4	oct-17	345265	2281054	1664
5	oct-17	345600	2289242	1825
6	oct-17	346893	2279228	1668
7	oct-17	347166	2292086	1859
8	oct-17	348247	2273979	1669
9	oct-17	349450	2272271	1657
10	oct-17	349818	2284988	1757
11	oct-17	350536	2274107	1669
12	oct-17	350834	2276380	1669
13	oct-17	351229	2280079	1686
14	oct-17	351744	2280781	1687
15	oct-17	351815	2272915	1668
16	oct-17	351991	2278559	1681
17	oct-17	352500	2277300	1677
18	oct-17	352618	2279064	1689
19	oct-17	353095	2277032	1674
20	oct-17	355293	2278744	1758
21	oct-17	358102	2278755	1795
22	oct-17	339732	2275502	1706
23	oct-17	343702	2276191	1668
24	oct-17	344581	2276298	1668
25	oct-17	338615	2280572	1760
26	oct-17	339073	2277804	1702
27	oct-17	341590	2267679	1756
28	oct-17	343505	2274043	1673
29	oct-17	339441	2270808	1718
30	oct-17	340682	2272148	1684

En el mapa de la Figura 22, se muestra la ubicación espacial de los pozos. El monitoreo se realizó a finales del temporal de lluvias del año 2017, que consistió en la medición del nivel estático de 30 pozos.

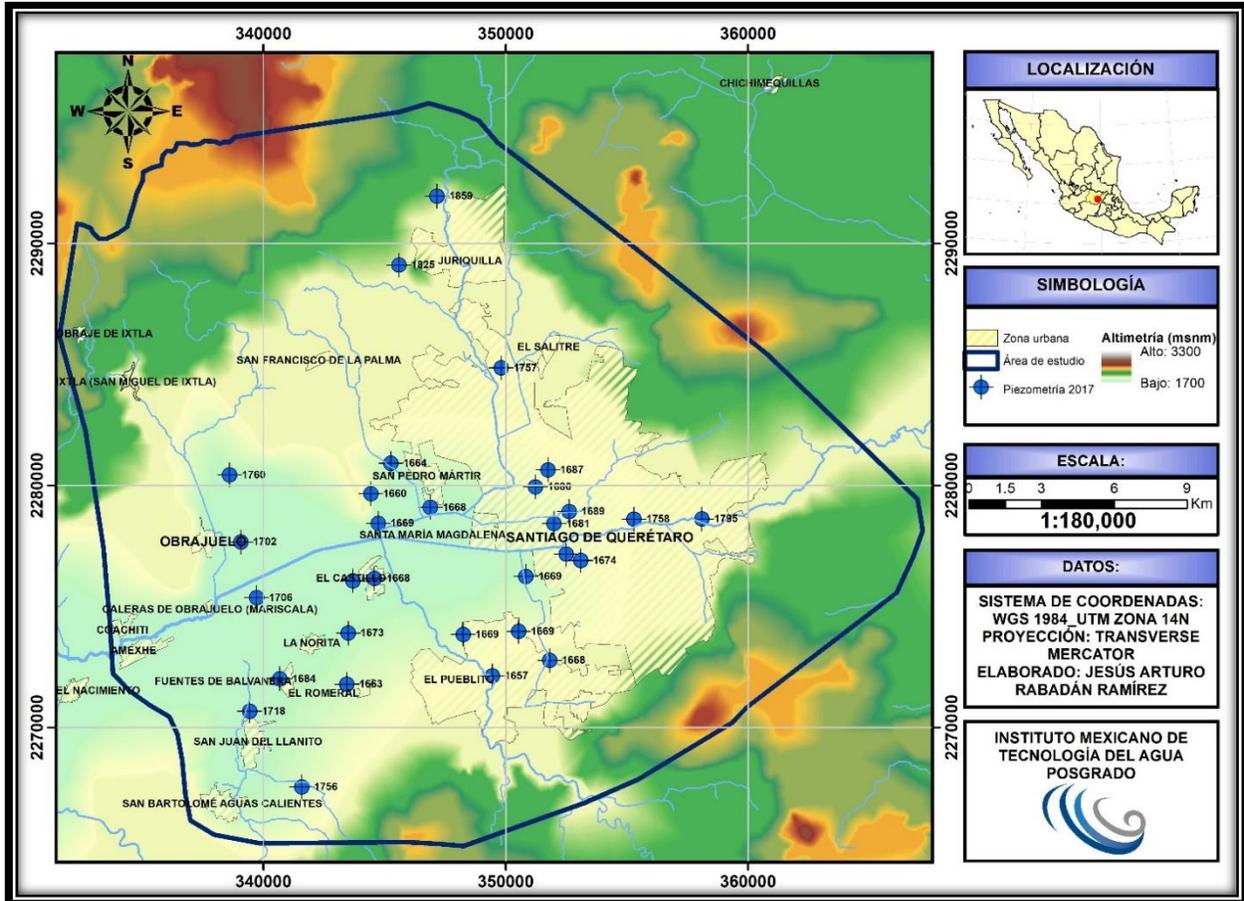


Figura 22. Mapa de la ubicación de los 30 pozos de agua del área de estudio (Fuente: elaboración propia con base a datos de INEGI, 2010 a y b).

En la Figura 23 se muestra el trabajo de campo realizando la medición del nivel piezométrico y posteriormente el muestreo hidrogeoquímico.



Figura 23. A) Equipo de medición. **B)** Pozo el Castillo. **C)** Medición del nivel piezométrico mediante una sonda.

3.3 Muestreo

Durante los recorridos de campo en el periodo de octubre del 2017 y abril del 2018, se colectaron 21 muestras de 19 pozos de agua y un manantial termal, de los cuales se midieron 6 parámetros físico-químicos *in situ* y 27 parámetros hidrogeoquímicos procesados en el laboratorio de La Unidad Académica Juriquilla del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Utilizando los respectivos métodos analíticos para cada especie química como se muestra en Tabla 7.

Para el muestreo se utilizaron botellas de plástico y preservadas con ácido nítrico con un pH menor o igual a 2, para posteriormente almacenarlas a una temperatura de 4 a 10°C hasta la realización de su análisis en el laboratorio.

Tabla 7. Parámetros físico químicos e hidrogeoquímicos.

	Parámetros	Equipo/técnica/método
Campo	Temperatura (°C)	Multi 340; Multi 350 Multiparameter water quality sonde 6600 V24
	Conductividad eléctrica	
	pH	
	Potencial Redox (Eh)	
	Oxígeno disuelto (mg/L)	
	Sólidos disueltos totales (SDT)	
Laboratorio	Dureza (CaCO ₂)	NMX-AA-072-SCFI-2001
	Aniones: Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ , F ⁻ , NO ₃ ⁻	Cromatografía de líquidos de alto desempeño. (HPLC)
	Cationes: Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ Metales: Al ³⁺ , As, B ³⁺ , Ba ²⁺ , Be ²⁺ , Cd ²⁺ , Cu ²⁺ , Fe, Li ⁺ , Mn ²⁺ , Ni ²⁺ , Pb ²⁺ , S, Si ⁴⁺ , Sr ²⁺ , V, Zn ²⁺	Espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado por inducción. (ICP/MS e ICP/OES)

En la Tabla 8 se muestra la ubicación geográfica y las características de los 19 pozos y un manantial termal.

Tabla 8. Localización de los pozos muestreados.

No	Pozo	Coordenadas		Profundidad (m)	Uso	Fecha
		X	Y			
1	San Miguel Ixtla	334496	2284596	30	Agua Potable	oct-17
2	Castillo 150m	343704	2276188	150	Riego	oct-17
	Castillo 200m	343704	2276188	200	Riego	oct-17
3	Granja Quanni	339712	2280751	78	Agua Potable	oct-17
4	La Estancia	343524	2274078	147	Agua Potable	oct-17
5	Fuentes Balvanera	340697	2272157	98	Agua Potable	oct-17
6	Calera Obrajuelo	337812	2275314	51	Agua Potable	oct-17
7	Punta de Obrajuelo	341712	2278761	110	Agua Potable	oct-17
8	La Norita	341389	2273718	95	Agua Potable	oct-17
9	Don Manuel	339073	2277804	89	Agua Potable	oct-17
10	Manantial termal Salitre	338495	2271335	0	Manantial	oct-17
11	Santa Fe	349378	2276970	146	Agua Potable	abr-18
12	Poniente 4	350248	2276663	139	Agua Potable	abr-18
13	San Pedro Mártir 1-BIS	346894	2280236	116	Agua Potable	abr-18
14	Ejido Romeral	344153	2272218	175	Agua Potable	abr-18
15	Pueblito 2 Garza	349448	2272279	160	Agua Potable	abr-18
16	San José de los Olvera 2	352506	2273910	134	Agua Potable	abr-18
17	Los Olvera 2	351534	2271793	146	Agua Potable	abr-18
18	San Francisco Corregidora	353751	2267773	-	Agua Potable	abr-18
19	Poniente 1	347775	2275764	161	Agua Potable	abr-18
20	Zapata	349406	2274513	160	Agua Potable	abr-18

En la Figura 24, se muestra el mapa de la ubicación de los 19 pozos muestreados y el manantial termal Salitre, colectados en el periodo de octubre del 2017 y abril del 2018, final del temporal de lluvias y principios de estiaje, respectivamente.

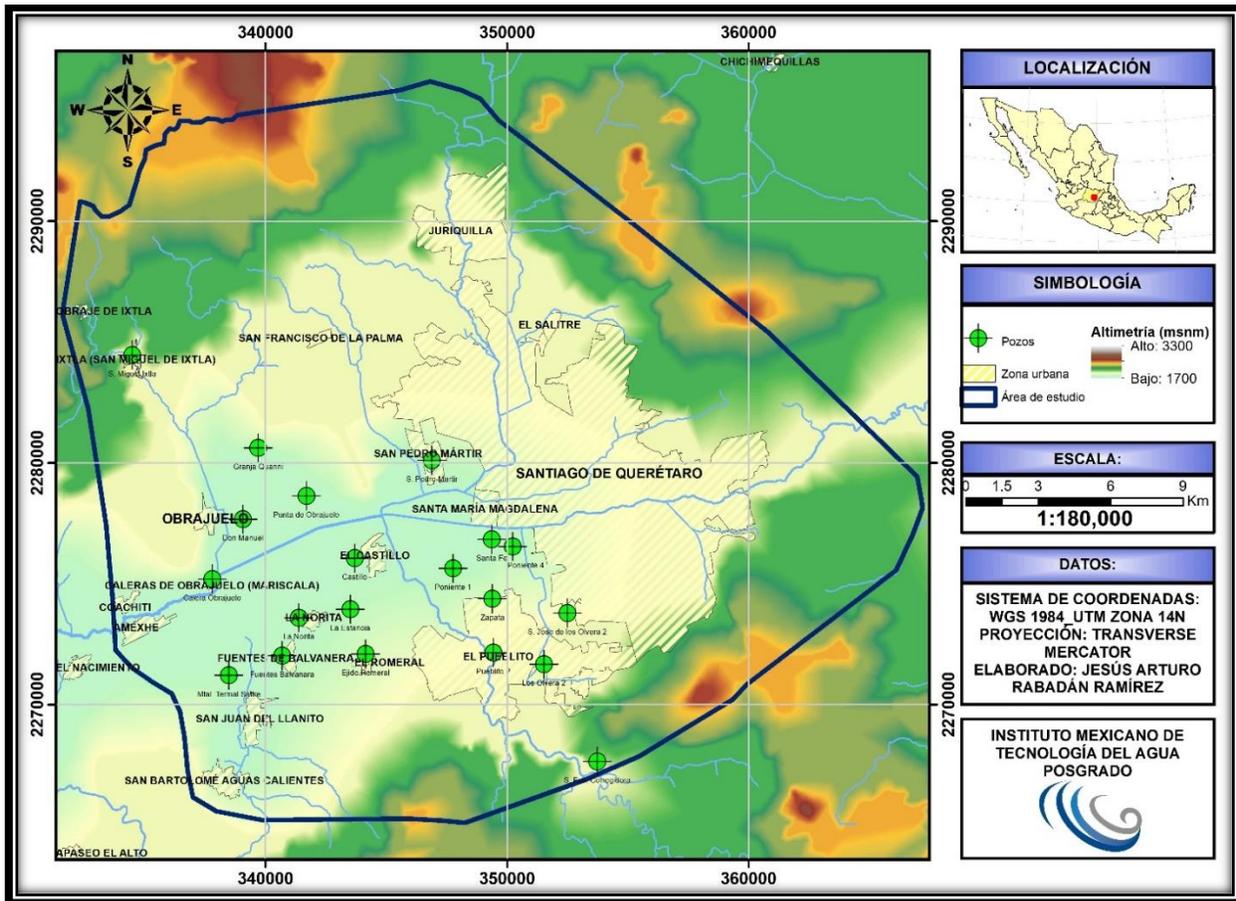


Figura 24. Mapa de la ubicación de los 19 pozos de agua y un manantial termal del área de estudio (Fuente: elaboración propia con base a datos de INEGI, 2010 a y b)

El muestreo se realizó de acuerdo a la norma NOM-230-SSA1-2002, salud ambiental (Figura 25). En ella se plasman los requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua, así también, los procedimientos sanitarios para el muestreo.

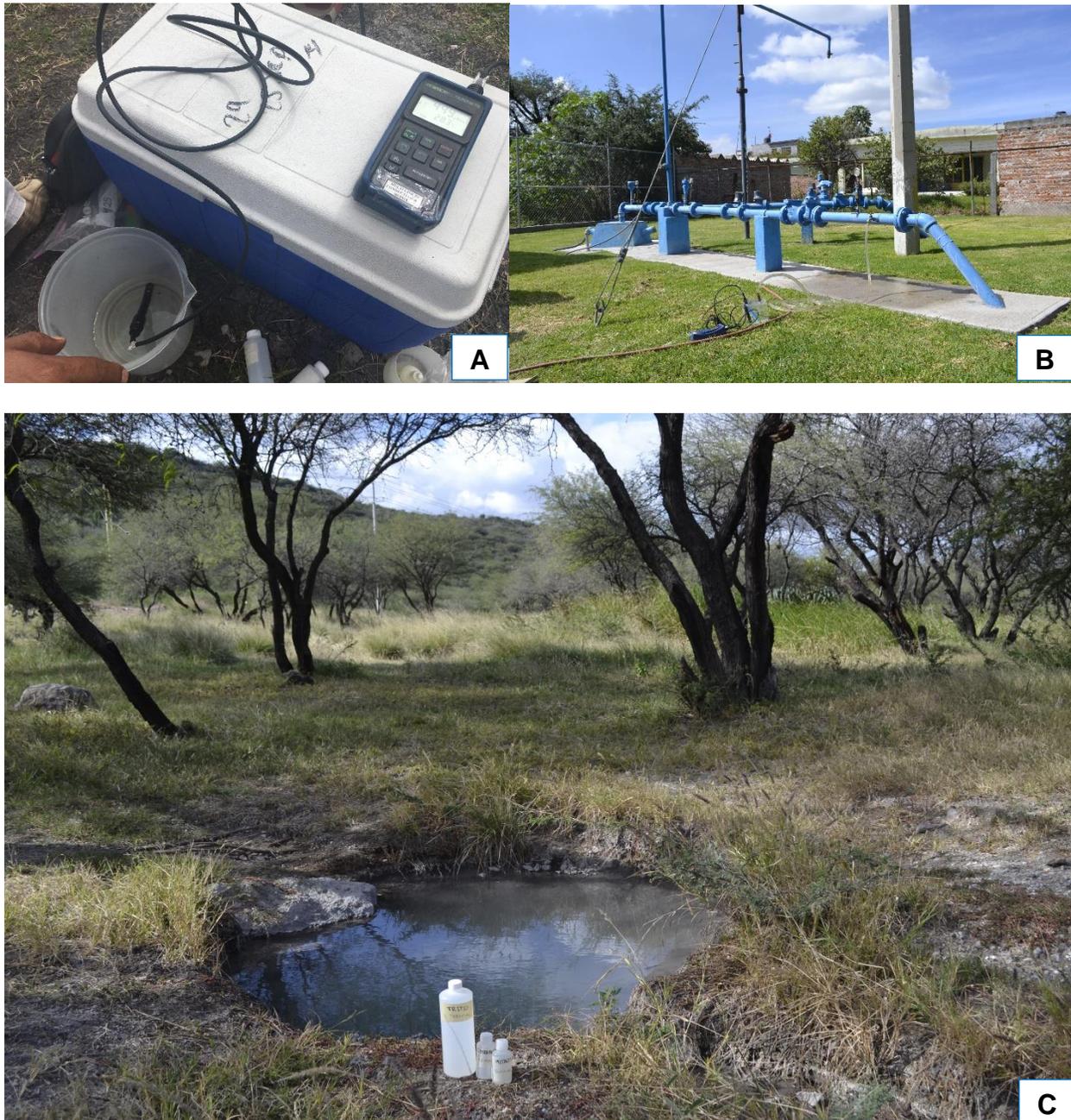


Figura 25. A) Multiparamétrico (Multi-parameter Multiline P4) para la medición del pH, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto, potencial redox y sólidos disueltos totales. **B)** Pozo muestreado, encargado de la Comisión Estatal del Agua de Querétaro. **C)** Muestreo del manantial termal Salitre.

3.4 Integración y procesamiento de la información.

La información climática, uso de suelo y vegetación, geología, topografía, hidrogeoquímica e hidrodinámica se integró en un sistema de información geográfica (SIG's), para este estudio se manejó la paquetería de ArcMap versión 10.5, con la finalidad de generar mapas y secciones del área de estudio.

Se utilizaron diversas herramientas informáticas para el manejo de los datos hidrogeoquímicos generados en la investigación. Para el tratamiento básico de los datos se utilizó el programa Microsoft Excel; los diagramas y gráficos se obtuvieron del programa Diagrammes; los mapas hidrogeoquímicos se elaboraron con el programa ArcMap versión 10.5; para el análisis estadístico se utilizó el programa InfoStat 2018 y para el análisis hidrogeoquímico con el programa Phreeqc 3.4.0.

3.5 Análisis de datos

En el siguiente apartado se describe la forma en la que se analizaron los parámetros físico-químicos e hidrogeoquímicos de las muestras colectadas.

3.5.1 Balance iónico

Una vez obtenidos los resultados de los análisis químicos de las muestras de agua, se determinó la calidad de las muestras colectadas mediante el cálculo del valor del error analítico del balance iónico de manera que la suma (en miliequivalentes) de cationes debe ser igual a la suma de aniones, como se describe en la ecuación de Freeze y Cherry (1979). Y de acuerdo a Custodio y Llamas (2001), un error de equilibrio de carga menor o igual al 10 % se considera aceptable.

Ecuación 4

$$\% \text{ de Error Analítico} = \frac{\sum \text{aniones} - \sum \text{cationes}}{\sum \text{aniones} + \sum \text{cationes}} * 100$$

Posteriormente se integró la información en paquetes informáticos y los resultados se representó en tablas, gráficas y diagramas, para facilitar su comparación visual.

3.5.2 Análisis de datos hidrogeoquímicos

El estudio de los análisis hidrogeoquímicos se simplifica con el empleo de gráficos y diagramas, para realizar comparaciones entre varios análisis de aguas de un mismo lugar en épocas diferentes o de diferentes lugares, interpretar las propiedades y la evolución del agua (Custodio *et al.*, 1983).

Familias de agua

Para caracterizar el agua subterránea, se utilizó el programa Diagrammes, con la finalidad de identificar las distintas familias de agua predominantes y se representaron en los siguientes diagramas (Figura 26):

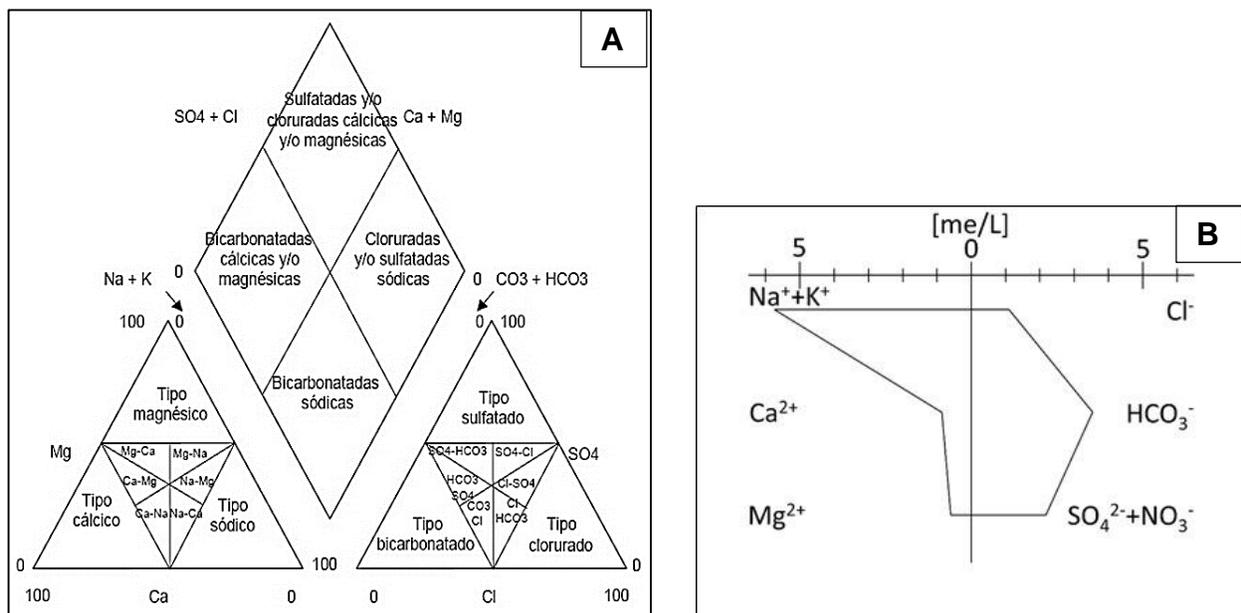


Figura 26. Representación del diagrama triangular de Piper (A) y diagrama de Stiff (B) (Fuente: Freeze y Cherry, 1978).

3.5.3 Análisis estadístico descriptivo y multivariado

Una vez obtenidos los resultados del laboratorio de las muestras de agua recolectadas de los pozos y del manantial, se continuó con su procesamiento y análisis de los elementos químicos, para identificar los procesos que controlan la evolución hidrogeoquímica y comportamiento de las aguas subterráneas, procesos de interacción agua-roca, mezclas de aguas, procesos hidrotermales, contaminación antropogénica, transporte de contaminantes, entre otros procesos.

Se realizó el análisis estadístico descriptivo y multivariado de los datos mediante el uso del software InfoStat 2018 y Microsoft Excel 2016, para el procesamiento de la información. Los análisis multivariados empleados son los siguientes:

Análisis de correlación

consistió en el análisis los datos muestrales para saber el grado de asociación o correlación entre dos o más variables de una población. El grado de correlación se expresa como un número comprendido entre -1 y +1 y se le conoce como coeficiente de correlación.

Análisis de conglomerados (AC)

Es una herramienta estadística ampliamente utilizada para clasificar datos auténticos en grupos de acuerdo con “similitudes” que los hacen más o menos homogéneos y distintos de otros grupos, se expresa en diagramas llamados dendogramas. Se presenta dos clasificaciones: Q-mode o R-mode.

Estas herramientas permiten el agrupamiento de las muestras y la creación de correlaciones entre los parámetros químicos. Los resultados se obtendrán mediante diagramas, gráficas y tablas, para la interpretación de las propiedades del agua, así como para hacer comparaciones.

3.5.4 Análisis de la calidad del agua

Para determinar la calidad del agua subterránea se utilizó el índice propuesto por Canadian Council of Ministers of the Environment, conocido como CCME-WQI (por sus siglas en inglés). Se consideró que el principal uso del agua extraída de los pozos en la zona de estudio es el abastecimiento público, por lo tanto, se consideraron los criterios para uso y consumo humano establecidos por la normatividad mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Considerando la flexibilidad del índice se consideraron 17 parámetros o variables a evaluar de dicha norma (Tabla 9).

Tabla 9. Parámetros y objetivos considerados para la evaluación del índice CCME-WQI para el uso de abastecimiento y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994).

No.	Parámetro	Unidades	Limite
1	pH	Log10	6.5 - 8.5
2	Sólidos Disueltos Totales	mg/L	1000
3	Dureza (CaCO ₃)	mg/L	500
4	Aluminio	mg/L	0.2
5	Arsénico	mg/L	0.025
6	Bario	mg/L	0.7
7	Cadmio	mg/L	0.005
8	Cloruros	mg/L	250
9	Cobre	mg/L	2
10	Fluoruros	mg/L	1.5
11	Fierro	mg/L	0.3
12	Manganeso	mg/L	0.15
13	Sodio	mg/L	200
14	Nitratos	mg/L	10
15	Plomo	mg/L	0.01
16	Sulfatos	mg/L	400
17	Zinc	mg/L	5

Descripción del método de cálculo

El índice de la calidad del agua se calcula mediante tres factores, que son los componentes del índice que representa el alcance, frecuencia y amplitud de cada variable; el cálculo de F1 y F2 es relativamente sencillo; pero en el caso de F3 se requieren algunos pasos adicionales. A continuación, se describen los pasos para el cálculo de los componentes y finalmente del índice.

Factor 1: Alcance

F₁ (alcance o ámbito de aplicación) representa el porcentaje de variables (parámetros) que no cumplen con los objetivos por lo menos una vez durante el periodo de tiempo considerando (variables que no cumplen), relativo al número total de variables analizadas (CCME, 2001) (ecuación 5):

Ecuación 5

$$F_1 = \left(\frac{\text{Número de variables que no cumplen el objetivo}}{\text{Número total de variables}} \right) \times 100$$

Donde las variables indican la calidad del agua para los objetivos definidos durante el periodo de tiempo que se calcula el índice.

Factor 2: Frecuencia

F₂ (frecuencia) representa el porcentaje de cada una de las pruebas (aprovechamiento) que no cumplen los objetivos (pruebas que no cumplen) (CCME, 2001) (ecuación 6):

Ecuación 6

$$F_2 = \left(\frac{\text{Número de pruebas fallidas}}{\text{Número total de pruebas}} \right) \times 100$$

Factor 3: Amplitud

F₃ (amplitud) representa la suma total de cada una de las pruebas (aprovechamiento) que no cumplen los objetivos. F3 se calcula en tres pasos (CCME, 2001).

(i) El número de veces que una concentración individual es mayor (ecuación 7).

Ecuación 7

$$\text{Desviación anómala}_i = \left(\frac{\text{Número de pruebas que no cumplen}}{\text{Objetivos}_j} \right) - 1$$

Ecuación 8

$$\text{Desviación anómala}_i = \left(\frac{\text{Objetivo}_j}{\text{Número de pruebas que no cumplen}} \right) - 1$$

(ii) La suma total de los datos de las pruebas individuales que están fuera del rango, y que son calculados al sumar las desviaciones anómalas de las pruebas individuales para los objetivos de la evaluación, se divide entre el número total de pruebas (tanto las que cumplen los objetivos como los que no los cumplen). Esta variable se denomina suma normalizada o suma de la desviación anómala, o NSE, y se calcula como (CCME, 2001):

Ecuación 9

$$NSE = \frac{\sum_{i=1}^n \text{desviación anómala}}{\text{no. total de pruebas}}$$

(iii) F3 se calcula por medio de una función asintótica de escalas normalizadas y la suma de la desviación anómala de objetivos (NSE), para obtener un rango entre 0 y 100 (CCME, 2001).

Ecuación 10

$$F_3 = \frac{NSE}{0.01 NSE + 0.01}$$

El índice CCME WQI se calcula como:

Ecuación 11

$$ICA = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right)$$

Ecuación 11. Índice de calidad del agua 1.0, tomado del Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (CCME, 2011)

Una vez obtenido el valor del índice, se emplearon los criterios de la Tabla 10 para determinar las condiciones y características del agua subterránea (CCME, 2001).

Tabla 10. Criterios para la clasificación de la calidad del agua subterránea.

Rango	Condición del agua	Descripción
95-100	Excelente	No contaminada.
80-94	Buena	Agua de buena calidad.
65-79	Regular	Agua con indicio de contaminación.
45-64	Contaminada	Agua contaminada.
0-44	Muy contaminada	Agua muy contaminada.

3.6 Evaluación Hidrogeológica

Consistió en la integración, procesamiento y análisis de los datos hidrogeoquímicos, hidrodinámicos y geológicos para determinar el comportamiento y las condiciones en las que se encuentra el agua subterránea y entender la situación de la zona de estudio.

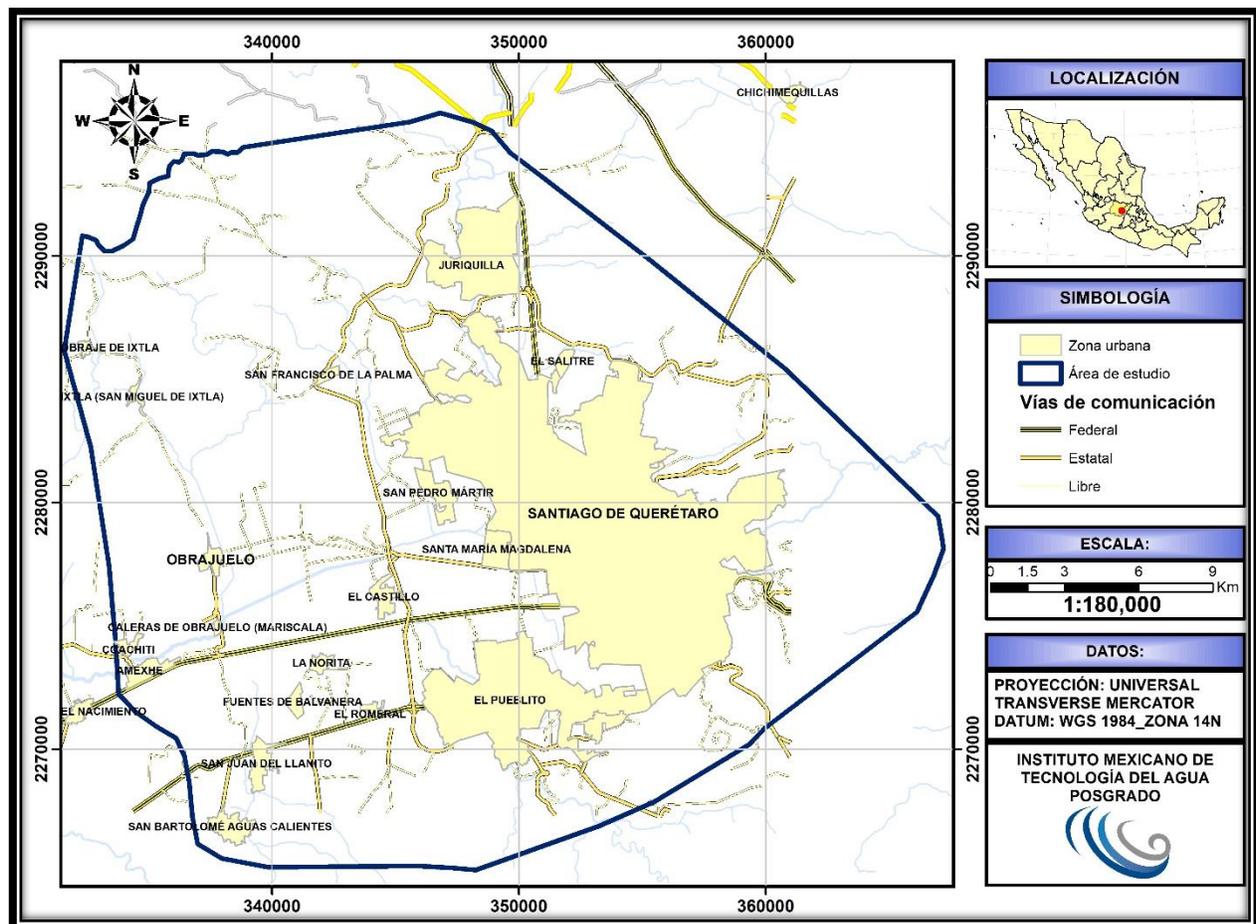
CAPITULO IV.

4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1 Marco geográfico

4.1.1 Localización y Extensión del Área

El área de estudio se ubica entre los estados de Guanajuato y Querétaro, abarca desde la comunidad de Obrajuelo municipio de Apaseo el Grande del estado de Guanajuato a la ciudad de Santiago Querétaro. La zona de estudio se encuentra entre los paralelos 20°45' y 20°28' de latitud norte y 100°37' y 100°15' de longitud oeste. Cubre un área de 763 km². Las principales vías de acceso son: carretera Querétaro Celaya/México 45D para después continuar por la carretera Corregidora Obrajuelo-Ixtla hasta llegar a la comunidad de Obrajuelo; saliendo de la ciudad de Querétaro por la carretera estatal No. 11 e incorporándose al libramiento Norponiente y desviándose a la derecha por la vía que conduce a Obrajuelo (Figura 27).



4.1.2 Clima

La zona de estudio presenta tres diferentes tipos de clima principalmente, esto de acuerdo a la clasificación propuesta por Köppen (1936), modificada por E. García (1973) para México. Presenta un clima semicálido-subhúmedo, semiárido-templado, semiárido-semicálido y templado-subhúmedo (CONABIO, 1998; García *et al.*, 1999; INEGI a y b, 2010; CONAGUA, 2015b). Por lo general, el clima es semiárido-semicálido y cubre un 60% del área total (Figura 28).

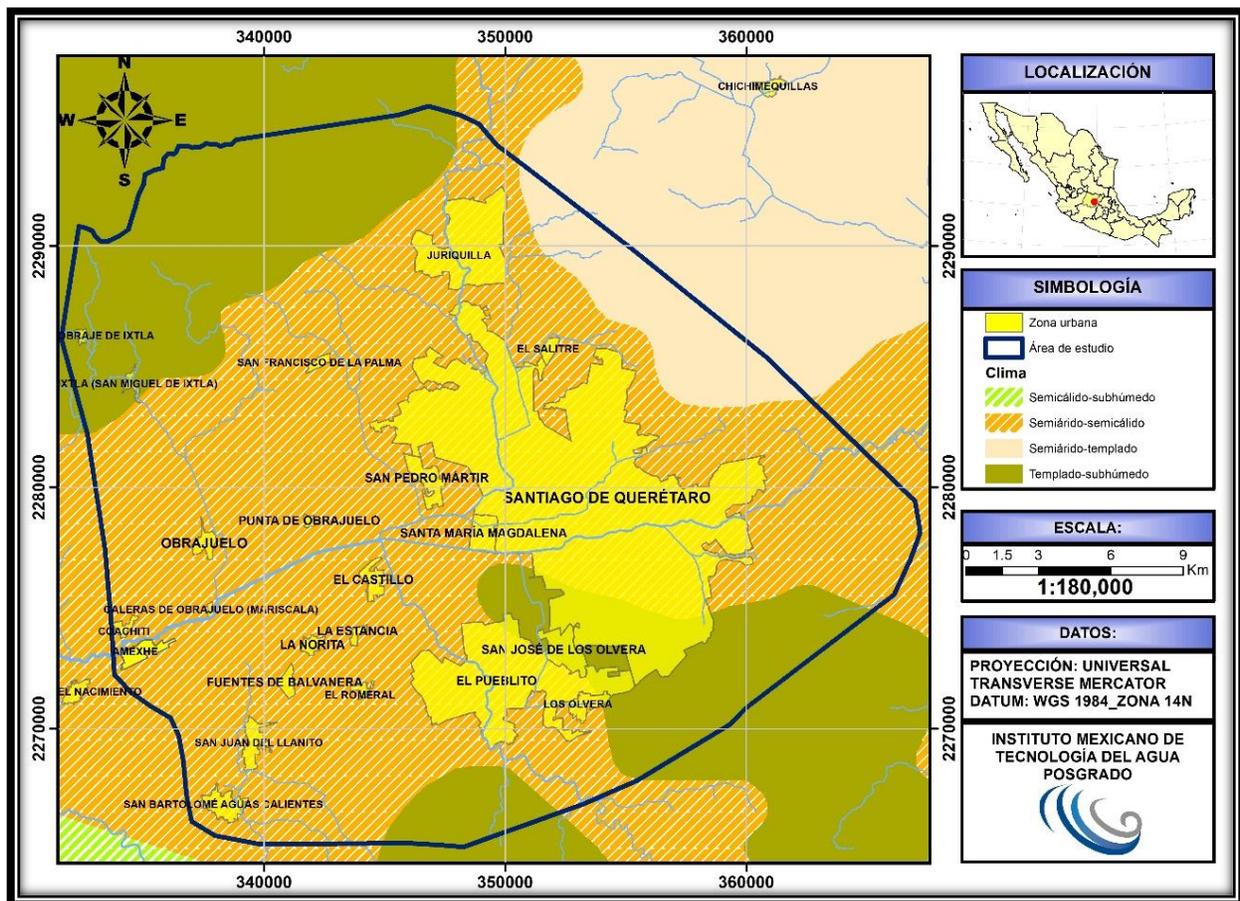


Figura 28. Mapa del clima del área de estudio (Fuente: elaboración propia de acuerdo a datos vectoriales de CONABIO, 1998; García *et al.*, 1999; INEGI, 2010 a y b y CONAGUA, 2015b).

4.1.2.1 Temperatura

En la Figura 29, se muestran las condiciones de la zona centro del área de estudio, presenta un clima semicálido, con una temperatura media anual mayor de 18°C, la temperatura del mes más frío es menor a 18°C y la temperatura del mes más caliente es mayor a 22°C. En las zonas altas presenta climas templados-subhúmedos, con una temperatura media anual entre 12°C y 18°C, la temperatura del mes más frío esta entre -3°C y 18°C y la temperatura del mes más caliente es de 22 °C. En la zona noroeste del área de estudio se presentan climas semiáridos-templados, con una temperatura media anual entre 12°C y 18°C, la temperatura del mes más frío es de -3°C y 18°C, la temperatura del mes más caliente es menor a 22°C (CONABIO, 1998; García *et al.*, 1999). La temperatura media anual oscila entre 12 y 20°C (CONAGUA, 2010 a y b).

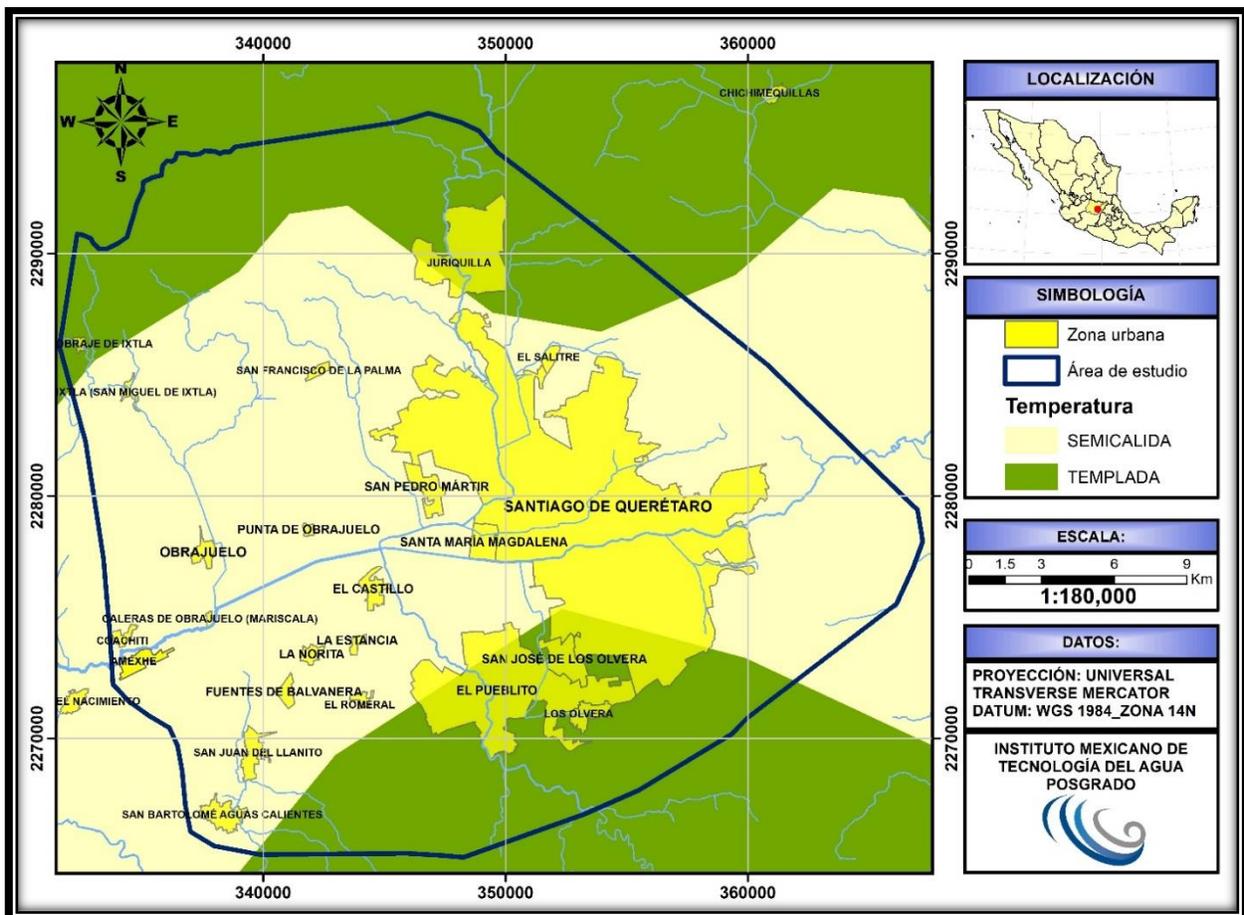


Figura 29. Mapa de la temperatura media anual del área de estudio (Fuente: elaboración propia con base a datos vectoriales de Vidal-Zepeda, 1990b).

4.1.2.2 Precipitación

En las regiones donde el clima predomina semiseco semicálido o semiseco templado, la precipitación media anual es relativamente escasa, en el orden de los 400 mm a los 600 mm para el período de 1990-1992, de acuerdo a los datos de la estación climatológica de Querétaro. En la Figura 30, se observa el mapa de la precipitación, donde la zona sur se tiene un gradiente de precipitación que alcanza a los 600 mm anuales en promedio (Vidal-Zepeda, 1990; CQRN, 2003; INEGI, 2010 a y b).

La evaporación potencial media anual en el valle de Obrajuelo y Querétaro es del orden de 2,050 a 2,200 mm, valores que sobrepasan por mucho a la precipitación pluvial, razón por lo que se considera un clima semiseco (CONAGUA, 2015b).

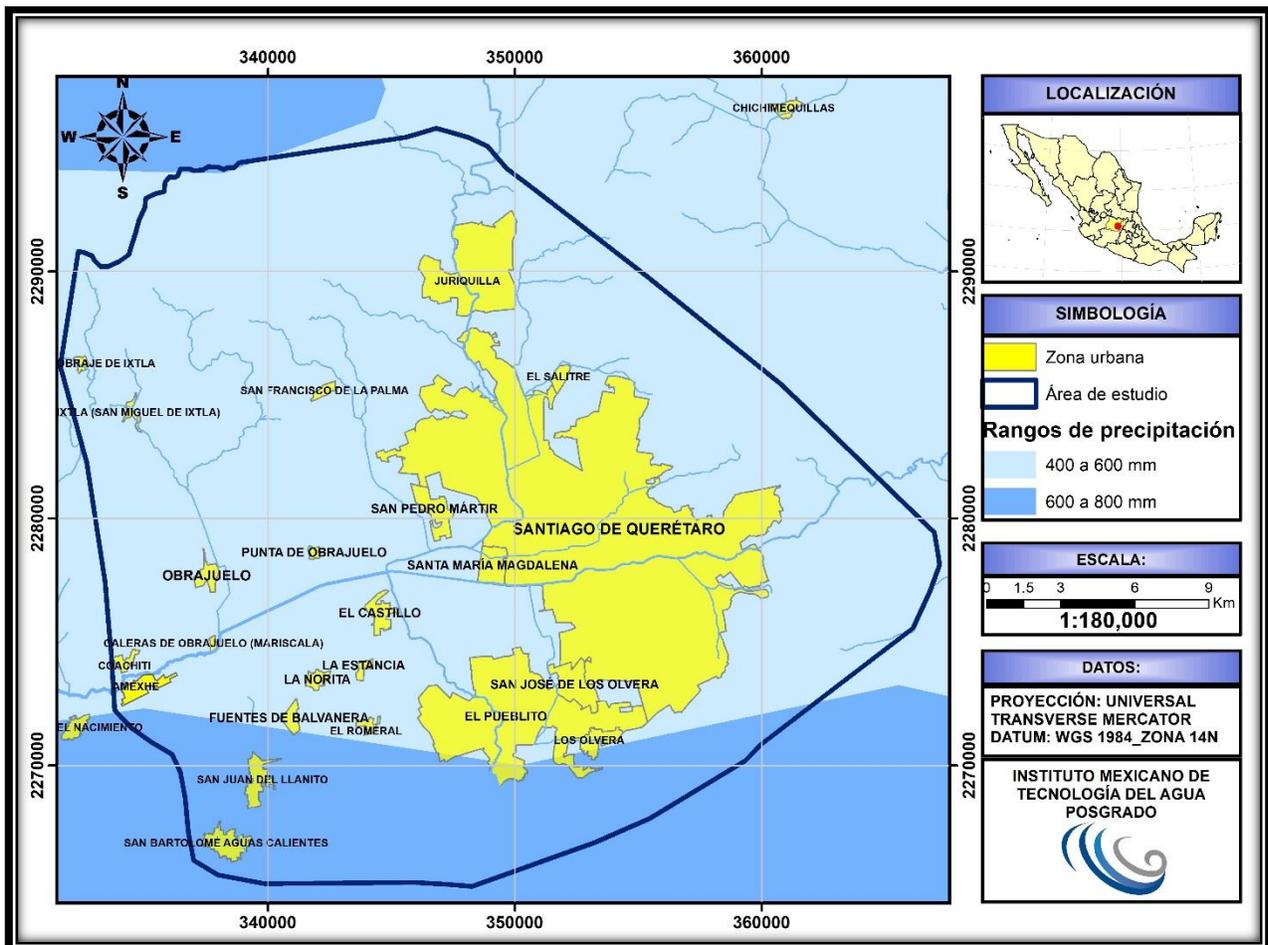


Figura 30. Mapa de precipitación media anual (1990-1992) del área de estudio. (Fuente: elaboración propia de acuerdo a los datos de Vidal-Zepeda, 1990).

4.1.3 Uso de suelo y vegetación

En el área de estudio existen dos provincias fisiográficas que influyen sobre el comportamiento de los suelos: la Mesa Central y el Eje Neovolcánico (Figura 31).

La Mesa Central, predominan suelos tipo Feozem y Háplico, se caracterizan por presentar tonos oscuros y abundante en materia orgánica, los nutrientes son propios, cuando las condiciones del terreno lo permiten; el uso potencial del suelo es para la agricultura de temporal o de riego (Figura 31) (INEGI, 1998; INEGI, 2010 a y b).

En el Eje Neovolcánico, se desarrollan comúnmente suelos tipo Vertisol y se distinguen por presentar tonalidades negras o grises, compuestas por arcillas. En general son muy fértiles, sin embargo, presentan cierta dificultad para su manejo, debido a la dureza del terreno, ya que entorpece la labranza y ocasionalmente tiene problemas de inundación cuando el drenaje es deficiente; el uso actual de este tipo de suelo es la producción de cultivos de grano y hortalizas, así como de fresa. Es un suelo fértil que favorece a la actividad agrícola, por lo tanto, la vegetación consiste principalmente de matorrales, pastizales y un porcentaje de bosques (Figura 31) (INEGI, 1998; 2010 a y b).

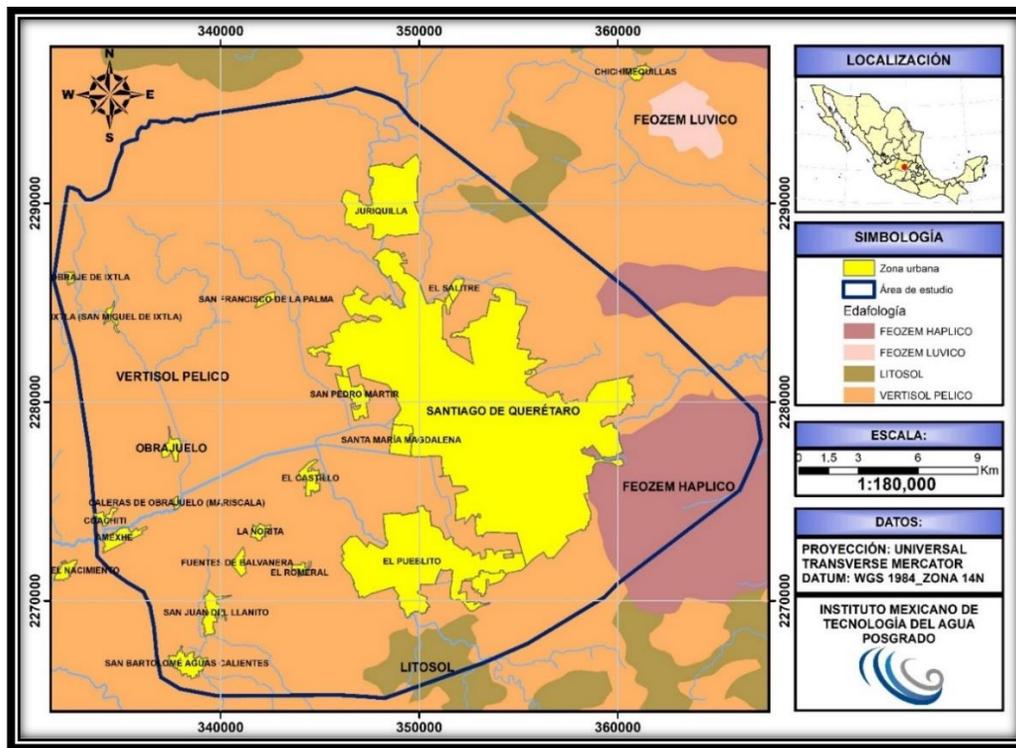


Figura 31. Tipo de suelo del área de estudio.
(Fuente: elaboración propia con base a datos vectoriales de CONABIO 1999).

4.1.4 Zonas Agrícolas

La principal actividad económica de la zona de estudio es la agricultura, tanto de temporal como de riego. Entre los cultivos se destacan los siguientes productos: la fresa, alfalfa, avena, trigo, frijol, cebolla, jitomate, maíz, sorgo, entre otros (INEGI, 2010 a y b).

En el mapa de la Figura 32, se observa la distribución de las zonas agrícolas tanto de riego como de temporal, cubriendo un 80% del total del área de estudio.

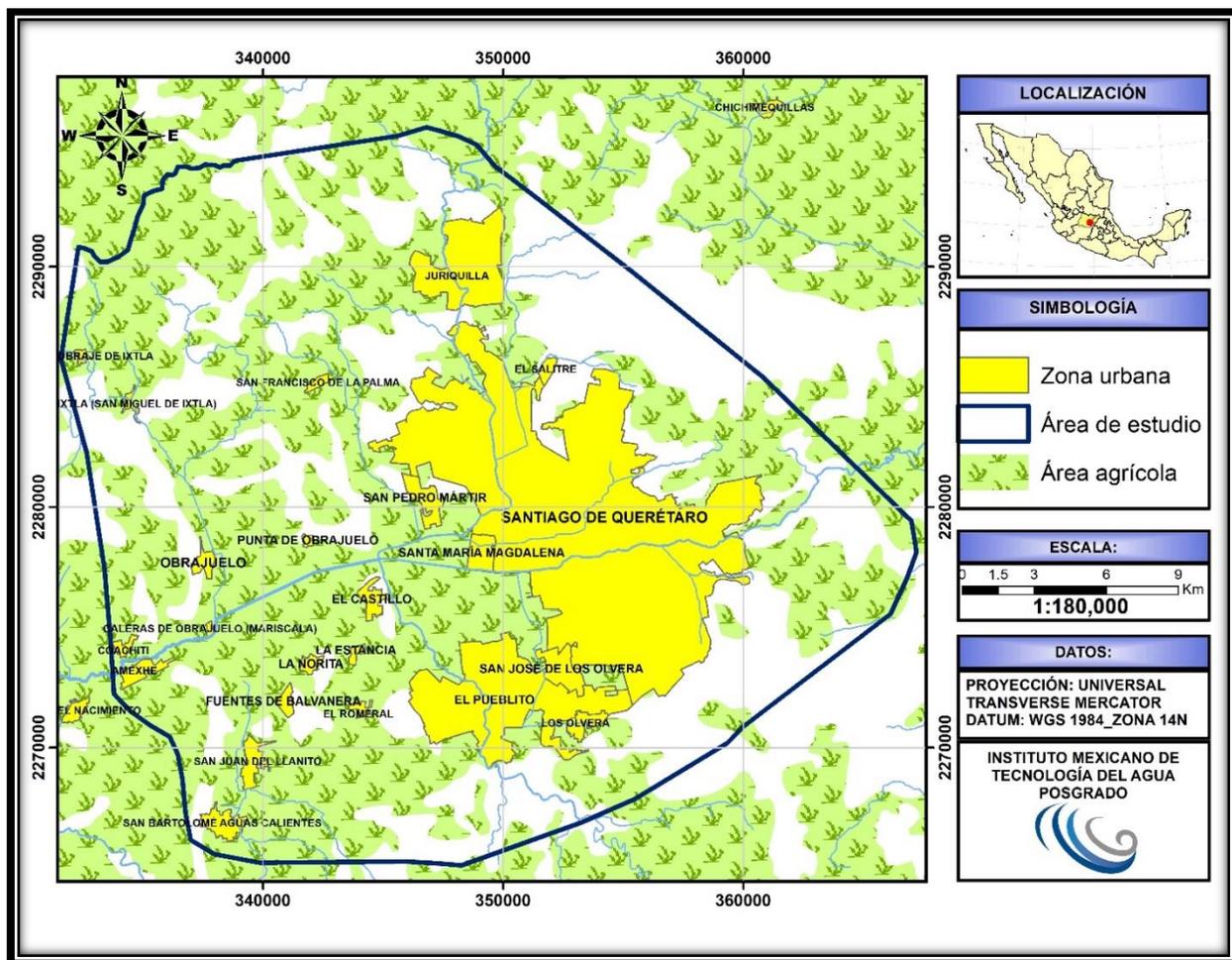


Figura 32. Mapa de las zonas agrícolas.
(Fuente: elaboración propia con base a datos vectoriales de CONABIO, 1999).

4.1.5 Zonas industriales

En el área de estudio existen aproximadamente 20 parques o zonas industriales, de ellos, la mayoría tienen varios años funcionando, otros son de reciente creación y, unos cuantos más, están en proceso de desarrollo.

De acuerdo a los datos del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), 2019 tomado de INEGI 2018, el área de estudio cuenta con un total de 3870 industrias (Figura 33). El 90% de las industrias se encuentran ubicadas en el Municipio de Querétaro, el 5% en Corregidora, el 3% en Apaseo el Alto, el 2% en el Marqués y el 1% en Apaseo el Grande.

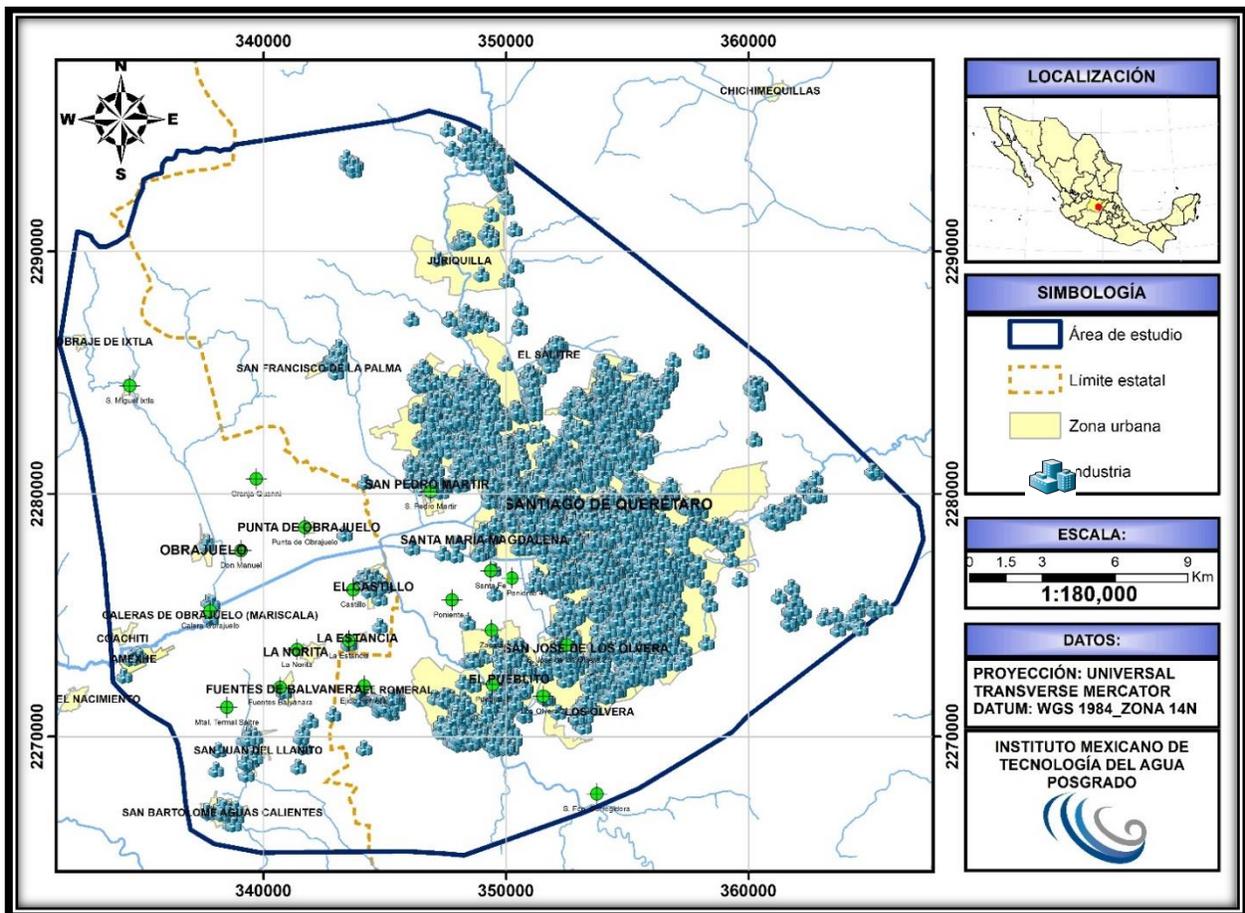


Figura 33. Mapa de las zonas industriales del área de estudio.
(Fuente: elaboración propia de acuerdo a los datos de INEGI, 2018).

4.2 Marco Fisiográfico

El área de estudio se encuentra ubicada entre los límites de las provincias fisiográficas denominadas: Mesa Central y Eje Neovolcánico, presentando una altura media de 1810 metros sobre el nivel del mar (Figura 34).

Mesa Central

El área que ocupa la Mesa Central comprende a la subprovincia Llanuras y sierras de Querétaro e Hidalgo. Es una zona de gran variedad morfológica, ya que presenta llanuras y sistemas montañosos con pequeñas elevaciones aisladas, presentando alturas que oscilan entre 2 000 y 2 960 msnm. Está compuesta por una gran variedad de rocas de origen distinto, pudiéndose identificar grandes extensiones de relleno aluvial y secuencias de rocas ígneas intrusivas y extrusivas, sedimentarias y metamórficas (INEGI, 1998).

Eje Neovolcánico

El Eje Neovolcánico ha sido definido como una provincia del cenozoico continental de origen volcánico, es una región activa de volcanes, con una orientación este-oeste (E-W), sus dimensiones varían entre 20 y 200 km de ancho por 100 km de longitud, cuyas altitudes oscilan entre 2000 y 3280m (INEGI, 1998). Está compuesta por rocas volcánicas de composición variada y presenta edades que van del Mioceno medio hasta el Holoceno. Se ha interpretado como un arco volcánico originado por la subducción de la placa Rivera y Cocos bajo la Placa Norteamericana (Alanís-Álvarez *et al.*, 2001). Es una zona con gran actividad tectónica, provocando fracturas y fallas que dan origen a pilares y fosas tectónicas que al mismo tiempo son rellenados por material clástico y/o derrames lávicos (CONAGUA, 2015 a y b).

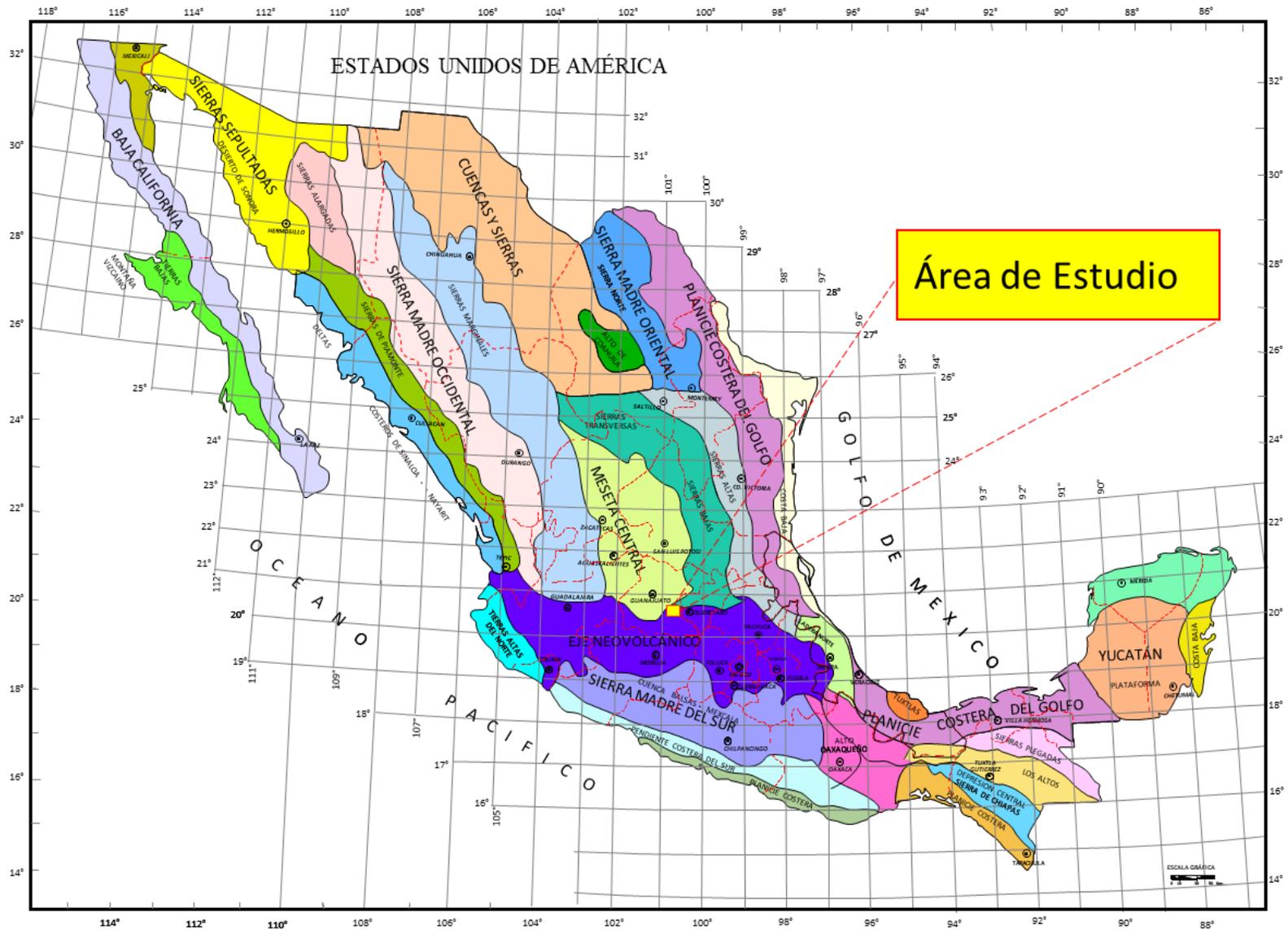


Figura 34. Mapa de las provincias fisiográficas de México (Fuente: Raisz, 1964).

4.2.1 Geomorfología

La zona de estudio está limitada por sierras y conos volcánicos, en los cuales se distinguen 4 unidades, y se describen a continuación: valles, conos volcánicos, sierras volcánicas y mesetas. En la zona se destaca el valle de Obrajuelo y el valle de Querétaro presentando una forma muy plana con una ligera pendiente hacia el oeste. En la porción norte, sur y oriental del valle, están limitadas por elevaciones topográficas que alcanzan hasta 800 metros sobre el nivel de valle (Figura 35 y Figura 36).

El valle de Obrajuelo se ubica al oeste del área de estudio, limitado por elevaciones topográficas de suave relieve, con topografía plana de 1760 msnm y está drenado por el río Querétaro que presenta una dirección de flujo este a oeste. Los conos volcánicos se orientan de norte y sur, constituidos por rocas extrusivas de composición basáltica, con un drenaje de tipo radial. En las sierras volcánicas de los extremos norte y sur, alcanzan una altura máxima de 2550 msnm y una mínima de 800 sobre el valle, mismas que exponen laderas con fuertes pendientes y arroyos que forman parte de un drenaje de tipo radial–dendrítico (Figura 35 y Figura 36).

Al norte del área de estudio, se encuentran rocas de composición basáltica, y hacia al sur se conforman por rocas ígneas de composición riolíticas. En la parte central-este, corresponde a los alrededores del valle de Obrajuelo y se observan mesetas constituidas por derrames lávicos de composición basáltica; éstas presentan una elevación entre 50 y 100 metros sobre los valles, con superficies onduladas y una ligera inclinación hacia el oeste.

Otra de las características principales de la zona, es la presencia de fallas regionales que originan escalonamientos de grandes bloques caídos hacia el este, dando lugar al valle de Obrajuelo y al valle de Querétaro (CONAGUA, 2015b).

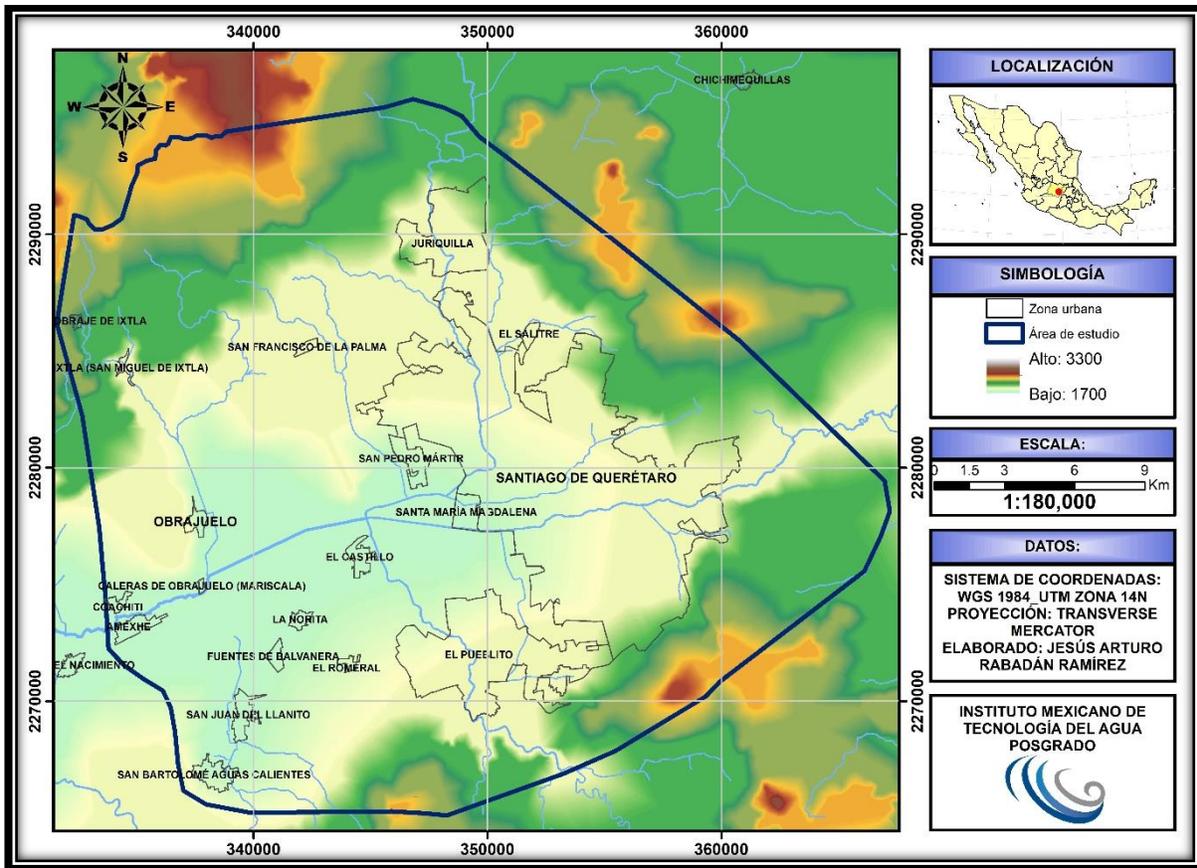


Figura 35. Mapa geomorfológico del área de estudio.
 (Fuente propia con base a datos de INEGI, 2010 a y b; CONAGUA, 2015b).

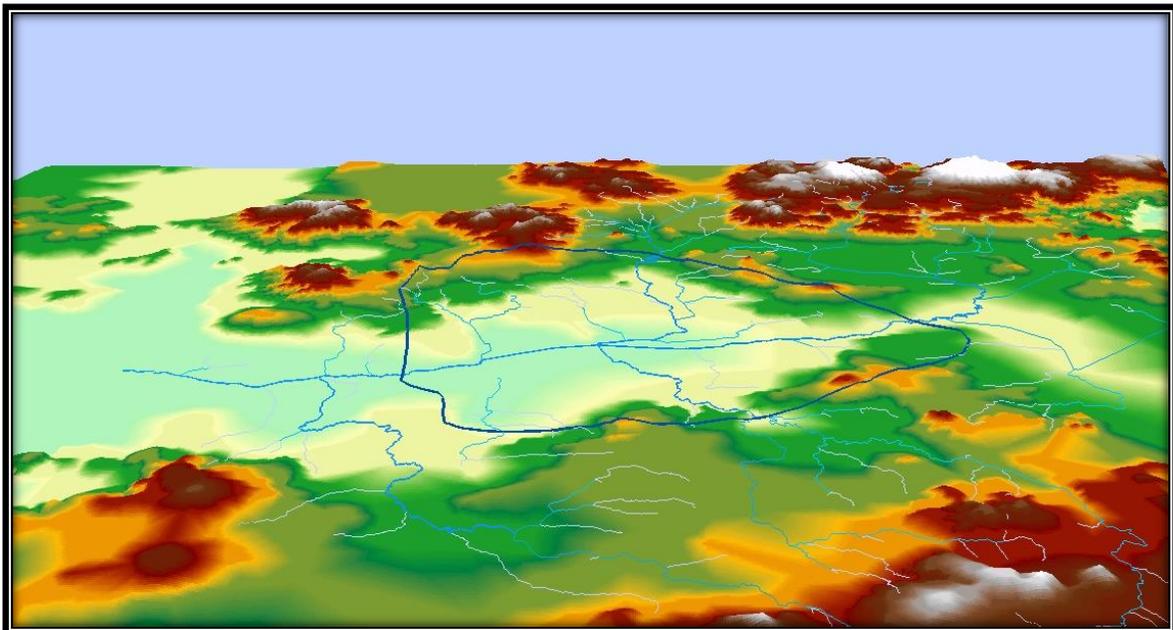


Figura 36. Modelo digital de elevación de la zona del valle de Obrajuelo-Querétaro
 (Fuente propia con base a datos de INEGI, 2010 a y b; CONAGUA, 2015b).

4.3 Marco Hidrológico

4.3.1 Hidrología superficial.

En la siguiente información se describen los aspectos más importantes en relación con el agua superficial del área de estudio y se destacan los siguientes aspectos:

4.3.1.1 Región hidrológica- administrativa: VIII. Lerma- Santiago-Pacífico.

El país está dividido en trece regiones hidrológico-administrativas (RHA), a su vez formadas por agrupaciones de cuencas. Los límites de las regiones respetan la división política municipal, para facilitar la administración e integración de datos socioeconómicos (CONAGUA, 2016). El área de estudio se localiza en la región hidrológica-administrativa VIII Lerma-Santiago-Pacífico. En la Tabla 11, se muestran algunos aspectos socioeconómicos de la región hidrológica-administrativa.

Tabla 11. Datos geográficos y socioeconómicos por región hidrológico-administrativa.

Clave	RHA	Superficie continental (km ²)	Agua renovable 2015 (hm ³ /año)	Población a mediados de año 2015 (millones de hab.)	Densidad de población (hab./km ²)	Agua renovable per cápita 2015 (m ³ /hab./año)	Municipios o delegaciones del D.F. (número)
VIII	Lerma Santiago Pacífico	192 722	35 080	24.17	125.4	1 451	332

Fuente: Conagua (2016).

4.3.1.2 Región Hidrológica: No. 12, Lerma-Santiago.

Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas (RH), en la cual, el área de estudio se ubica en la región hidrológica No. 12 Lerma-Santiago. En la Tabla 12, se presentan las características generales de la región hidrológica.

Tabla 12. Característica de la región hidrológica Lerma-Santiago.

Clave	RHA	Extensión territorial continental (km ²)	Precipitación normal anual 1981-2010 (mm)	Escorrentamiento natural medio superficial interno (hm ³ /año)	Escorrentamiento natural medio superficial total (hm ³ /año)	Número de cuencas hidrológicas
12	Lerma-Santiago	132 916	717	13 180	13 180	58

Fuente: Conagua (2016).

4.3.1.3 Cuenca Río la Laja

La región hidrológica del río Lerma-Santiago tiene una extensión de 2496 km² en el estado de Querétaro. Representa el 21% de la superficie estatal. Los municipios que la conforman son: Querétaro, Corregidora, El Marqués, Huimilpan y una pequeña porción al sur de Amealco. En esta región se encuentra ubicada la cuenca del río Laja, con una superficie de 2274 km². La cuenca Laja tiene como afluentes a los ríos Pueblito y Querétaro, que escurren finalmente hacia la zona de Lerma (CQRN, 2001).

4.3.1.4 Subcuenca Río Apaseo

El área de estudio se ubica en la región hidrológica No. 12 Lerma-Santiago, en la cuenca Río la Laja y subcuenca Río Apaseo. La corriente superficial más importante de la entidad es el río Querétaro y su afluente principal el río el Pueblito. El río Querétaro nace en el municipio de el Marqués en la porción centro occidental del Estado y adopta una dirección noreste-suroeste, que posteriormente cambia de este a oeste al entrar al valle de la ciudad de Querétaro. El río atraviesa la ciudad de Querétaro de este a oeste y cambia de nombre por el Arroyo Magdalena hasta llegar a las Adjuntas, sitio donde recibe las aportaciones del río El Pueblito, internándose en territorio del Estado de Guanajuato, dando origen al río Apaseo donde finalmente se desemboca al río La Laja (CQRN, 2001; CONAGUA, 2015b).

En la sierra del sur se generan los escurrimientos del río El Pueblito, con dirección de sur a norte y llegan y cruzan al municipio de Corregidora, donde cambia de rumbo de sureste-noroeste y atraviesan la llanura hasta llegar a las Adjuntas, lugar donde se une con el arroyo Magdalena. En la porción norte del área en estudio se encuentran dos arroyos de gran importancia que aportan al río la Laja y son: el arroyo San Isidro que cruza la población de Santa Rosa Jáuregui, y el arroyo Jurica, ambos recorren una dirección general oeste-este (CQRN, 2001; CONAGUA, 2015b).

Los principales cuerpos de agua presentes en la subcuenca Río Apaseo son: Presa el Batán, Santa Catarina, el Carmen, Juriquilla o lago el Cajón, San Pedro Huimilpan y el lago Salitre. En la Figura 37, se muestra el mapa de la hidrología de la zona de estudio.

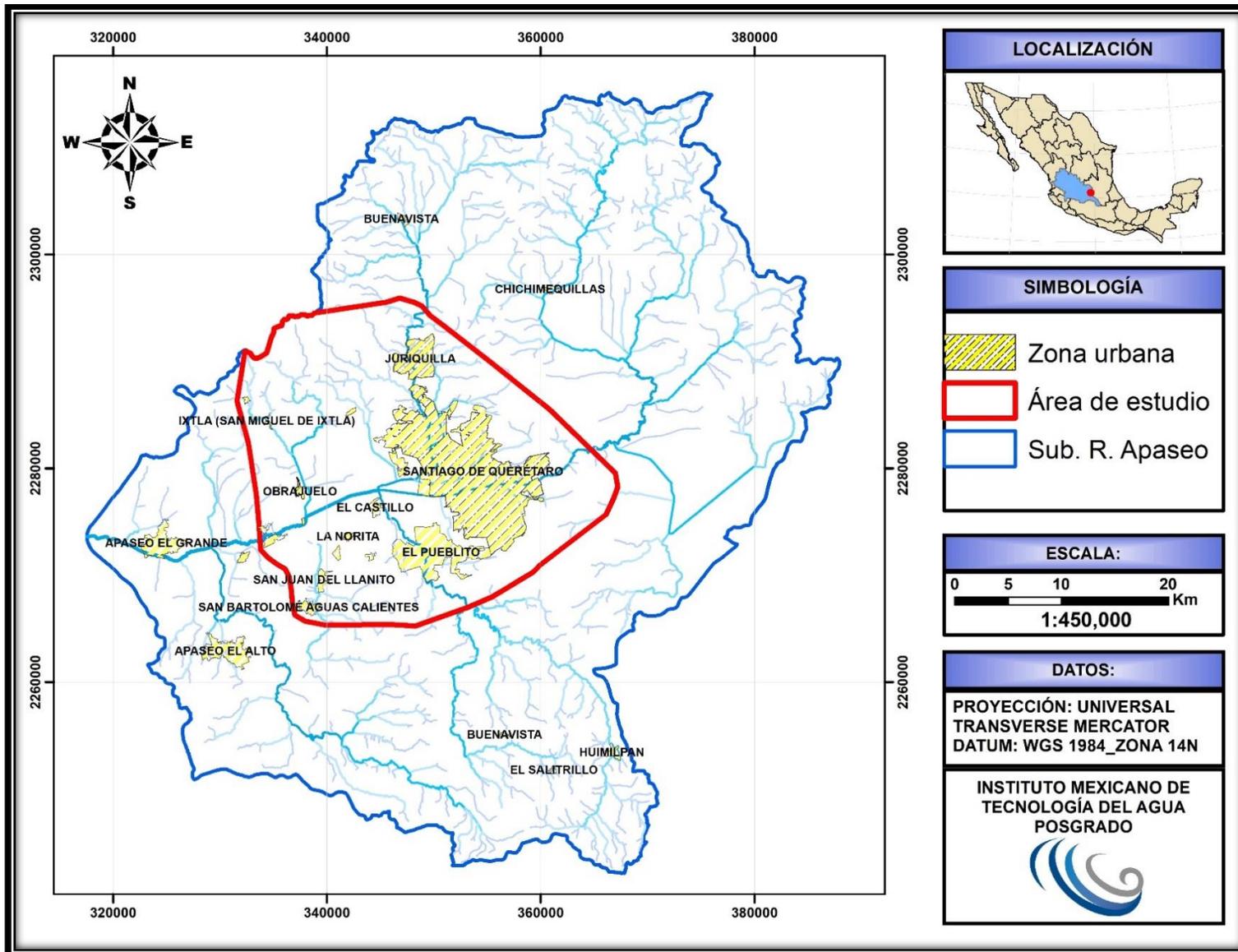


Figura 37. Subcuenca Río Apaseo ubicando el área de estudio.
(Fuente propia: de acuerdo a datos de SIALT; INEGI, 2010 a y b)

4.3.2 Hidrología subterránea.

El área de estudio se ubica entre los acuíferos administrativos valle de Buenavista, valle de Amazcala, valle de San Juan del Río, valle de Huimilpan, valle de Celaya y valle de Querétaro. Principalmente se encuentra en el acuífero administrativo número 2201 que corresponde al acuífero del Valle de Querétaro (Figura 38).

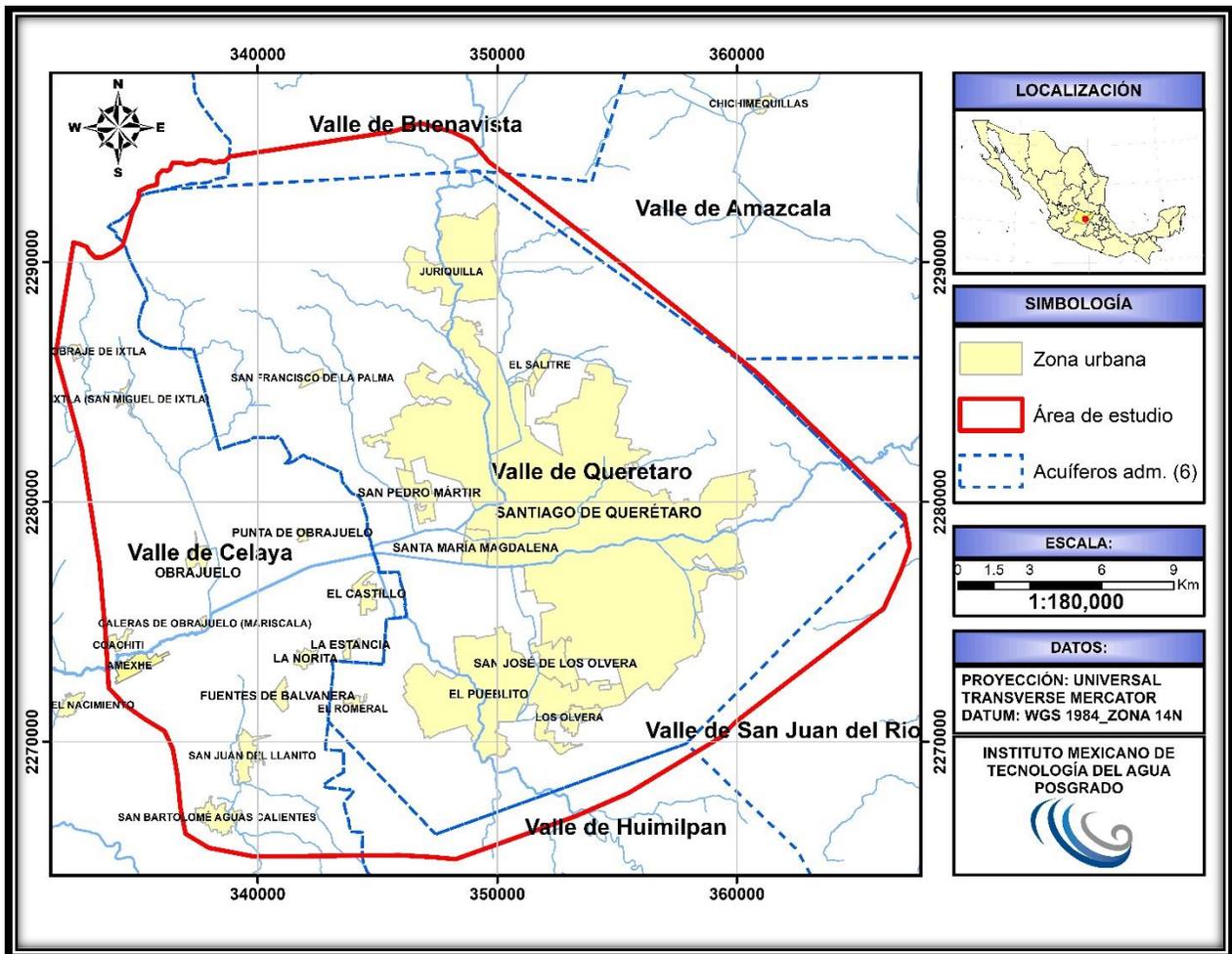


Figura 38. Ubicación de los acuíferos administrativos.

En la Tabla 13, se describen las características principales del acuífero administrativo valle de Querétaro.

Tabla 13. Características del acuífero administrativo 2201.

Acuífero Valle de Querétaro (2201)	
Extensión superficial:	484 km ²
Los municipios que lo comprenden son:	Querétaro, Corregidora y El Marques.
Clima:	Semiseco, semicálido, con lluvia en verano y con un porcentaje de lluvia invernal menor de 5 Precipitación: media anual en el valle es del orden 550 mm (período de 1921-1996) Temperatura: es del orden de 17° C.
Litología:	Rocas sedimentarias e ígneas, con edades que van del Cretácico al reciente.
Profundidad del nivel estático:	(Periodo 1994 a la fecha) en la zona plana del valle es de 100 a 110 metros.
Recarga total:	70.0 Mm ³ /año
Descarga total:	4 millones de metros cúbicos por año (Mm ³ /año).
Uso del agua:	Uso agrícola y abrevadero, uso público- urbano y recreativo y uso industrial.
Volumen anual de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA al 30 de abril de 2002	Es de 133.012226 Mm ³ /año.
Disponibilidad media anual:	-67.012226 Mm ³ /año. (no existe volumen disponible para nuevas concesiones)

(Fuente: con base a datos de CONAGUA, 2015b).

Uso del agua subterránea

El estudio realizado por Suez-Lesser (2017), se censaron un total de 316 pozos, de los cuales, 118 están controlados por la Comisión Estatal del Agua (CEAQ) y 198 son pozos particulares. De los 316 pozos, solo 213 se encuentran activos y 103 están inactivos (Tabla 14). De los 213 pozos activos, 127 pozos que equivalen el 60% son para agua potable; 46 pozos (22%) son para uso agrícola; 37 pozos (17%) son para uso industrial y; solo 3 pozos (1%) son para abrevaderos (Figura 39).

Tabla 14. Usos del agua subterránea de pozos activos del área de estudio.

Censo de pozos		
Uso	Pozos	Porcentaje
Potable	127	60
Agrícola	46	22
industrial	37	17
abrevadero	3	1
Total	213	100

(Fuente: elaboración con base a datos de Suez-Lesser 2017).

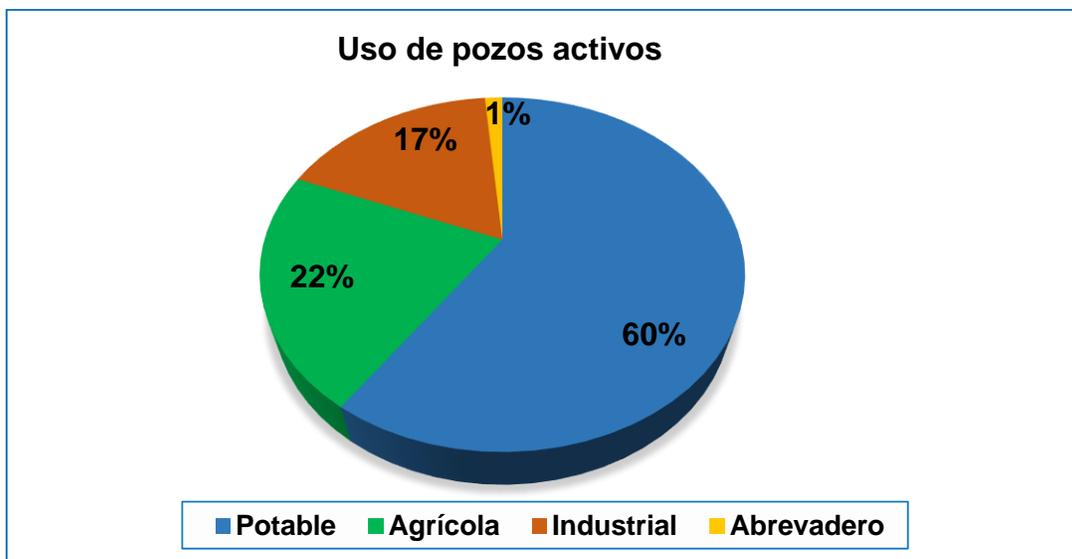


Figura 39. Usos del agua subterránea.
(Fuente: con base a datos de Suez-Lesser, 2017).

4.4 Marco Geológico

4.4.1 Estratigrafía

La estratigrafía del área de estudio está representada por un basamento mesozoico cubierto por una secuencia de rocas volcánicas de composición variada, alternadas con depósitos sedimentarios.

A continuación, se describe las unidades estratigráficas (litología, espesor, distribución y edad) desde la base hacia la cima:

Caliza y arenisca (KiCz)

Litología y espesor: La unidad está formada principalmente por calizas, con intercalaciones de arenisca calcárea, marga y lutita (KiCz Figura 40). Su espesor esta indefinido ya que no aflora su base y, además, en la secuencia se encuentra plegada y fallada. El depósito de esta unidad se dio en un ambiente marino.

Distribución: En el área de estudio la unidad aflora en la localidad de Juriquilla, Qro., se exponen calizas arcillosas intercaladas con lutitas y se encuentran en contacto con rocas volcánicas de composición basáltica y dacítica.

Edad: La edad de esta unidad ha sido determinada por su contenido fósil, donde reportaron fauna de amonita de edad cretácica del Aptiano-Albiano (Álaniz-Álvarez *et al.*, 2001; Nieto-Samaniego *et al.*, 1999).

Conglomerado Polimíctico (TeCg)

Litología y espesor: La unidad (TeCg en la Figura 40) se la denomina Conglomerado Rojo de Guanajuato. Está constituida por areniscas y conglomerados de color rojo con ligera estratificación. La unidad se encuentra intercalada por derrames de basalto y, ocasionalmente, de ignimbrita riolítica, así como diques y cuerpos intrusivos andesíticos y riolíticos.

Distribución: Dentro del área de estudio no hay un afloramiento de esta unidad. Sus mayores afloramientos se encuentran en la ciudad de Guanajuato. Estas rocas descansan discordantemente sobre el basamento mesozoico y son cubiertas de manera discordante, por la secuencia volcánica oligocénica.

Edad: Su edad ha sido asignada mediante al contenido fósil encontrado en Guanajuato del eoceno y por el fechamiento isotópico (49.3 ± 1 Ma, K-Ar roca total) (Álaniz-Álvarez *et al.*, 2001; Nieto-Samaniego *et al.*, 1999).

Andesita El Cedro (ToA)

Litología y espesor: Esta unidad (ToA en la Figura 40) consiste principalmente de rocas volcánicas que incluyen lavas y algunas tobas. Su composición varía de basáltica a andesítica. Pertenece a un ambiente continental. Presenta un espesor muy variable, en algunos lugares llega a tener un máximo de 100 m.

Distribución: En el área de estudio la Andesita El Cedro afloran en el poblado El Salitre, Qro. Las rocas se depositaron sobre una superficie muy irregular y se encuentran yaciendo sobre el conglomerado polimíctico.

Edad: La edad que se le asigna es del Oligoceno medio (30.7 ± 0.6 Ma.), basada en los fechamientos de K-Ar de la Andesita El Cedro (Cerca-Martínez *et al.*, 2000; Nieto-Samaniego *et al.*, 1999; Álaniz-Álvarez *et al.*, 2001).

Ignimbrita (Tig)

Litología y espesor: En esta unidad (Tig en la Figura 40) se agrupan ignimbritas de composición ácida que presentan distintos grados de piroconsolidación, aunque en su mayoría se observa poco soldada. Las ignimbritas están intercaladas con depósitos de toba y vitrófidos. Pertenece a un ambiente continental. El espesor va de los 100 a 300 m aproximadamente.

Distribución: Los afloramientos de esta unidad aparecen al norte de la localidad de Juriquilla. Las ignimbritas yacen discordantemente sobre el basamento mesozoico, o bien sobre la Andesita El Cedro.

Edad: Las rocas de esta unidad pertenecen al Oligoceno tardío de acuerdo a un fechamiento isotópico de la secuencia ignimbritica realizado por el método K-Ar en sanidinos, dando una edad de 28.6 ± 0.7 Ma. (Nieto-Samaniego *et al.*, 1996; Álaniz-Álvarez *et al.*, 2001).

Dacita Obrajuelo (TDo)

Litología y espesor: La unidad Dacita Obrajuelo (TDo en la Figura 40) se compone de rocas volcánicas. Son de color rosa y ricas en fenocristales de andesina, contienen además feldespatos potásicos, biotita, anfíbol y bajo contenido de cuarzo. Los domos alcanzan alturas entre 150 y 200 m desde su base hasta la cima.

Distribución: Afloran al noroeste de Querétaro a manera de domos y forman un amplio tren estructural de dirección NE-SW, desde el volcán San Pedro hasta Santa Rosa de Jáuregui. A esta unidad se incluye un cuerpo ígneo de textura porfídica y composición intermedia que aflora en Juriquilla, debido a su posición estratigráfica y mineralógica.

Edad: Se le asigna una edad entre el Oligoceno y el Mioceno medio (Álaniz-Álvarez *et al.*, 2001).

Secuencia Cerro Colorado (Tdcc)

Litología y espesor: La secuencia (Tdcc en la Figura 40) está compuesta por derrames volcánicos, depósitos de lahar y brechas de composición andesítica y dacítica. Presenta espesores mayores a 20 m.

Distribución: La secuencia Cerro Colorado está relacionada al domo Cerro Colorado, que aflora en el flanco oriental del volcán Palo Huérfano y subyace a los derrames del volcán Palo Huérfano.

Edad: Esta unidad se reporta una edad K-Ar en plagioclasas de 16.1 ± 1.7 Ma. (Pérez-Venzor *et al.*, 1996; Álaniz-Álvarez *et al.*, 2001).

Andesita y Basalto La Joya (Tmj)

Litología y espesor: La unidad Andesita y Basalto La Joya (Tmj en la Figura 40) se compone de rocas volcánicas de composición básica e intermedia provenientes de estratovolcanes. Los espesores de los derrames son menores a 70 m.

Distribución: La unidad Andesita y Basalto La Joya proviene de los estratovolcanes Palo Huérfano, La Joya, San Pedro y otros derrames y aparatos menores que afloran al sur de la Mesa Central. Esta unidad yace discordantemente sobre la ignimbrita, la Dacita Obrajuelo y las Rocas mesozoicas. Sobre ella descansan el volcánicoclástico

Querétaro y el Basalto Querétaro. También se puede observar derrames de basalto perteneciente a esta unidad intercalados con la unidad Arenisca y Conglomerado cenozoicos en la depresión.

Edad: Su edad se ubica en el Mioceno medio ya que las edades conocidas varían de 12.4 a 9.9 ± 0.4 Ma. (Pérez-Venzor *et al.*, 1996; Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001).

Volcaniclástico Querétaro (TmTq)

Litología y espesor: La unidad Volcaniclástico Querétaro (TmTq en la Figura 40) se denomina así a los depósitos fluviales, aluviales y piroclásticos no consolidados compuestos principalmente de fragmentos de pómez y otros materiales volcánicos. Algunas capas contienen más de 80% de clastos de pómez de varios centímetros de diámetro, son de color claro, y están intercaladas con sedimentos lacustres arenosos. El espesor de esta secuencia llega a tener hasta 100 m.

Distribución: La secuencia aflora en las canteras ubicadas en los escarpes de las fallas, estos sedimentos se depositaron en depresiones topográficas, por lo que su distribución puede delimitar las zonas elevadas en el tiempo del depósito. Esta unidad se encuentra depositada discordantemente sobre la Dacita Obrajuelo y a la Andesita y Basalto La Joya. Le subyace a la unidad Basalto Querétaro.

Edad: La edad de estos depósitos está relacionada con el volcanismo del Mioceno Medio y tardío (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001).

Secuencia Lacustres (TmLa)

Litología: es una secuencia de sedimentos lacustres (TmLa en la Figura 40) se denomina así a los depósitos fluviales o aluviales no consolidados de un lago, compuestos principalmente de fragmentos arenosos, arcillas y otros materiales volcánicos propios de la región. Presentan baja permeabilidad. Algunas capas contienen más del 80% de clastos de pómez de varios centímetros de diámetro, son de color claro, y están intercaladas con sedimentos lacustres arenosos. El espesor de esta secuencia llega a tener hasta 100 m.

Distribución: La secuencia se encuentra intercalada con la unidad vulcanoclastica, estos sedimentos se depositaron en depresiones topográficas, generando lentes sedimentarios.

Edad: Presentan una edad del oligoceno-mioceno (Suez-Lesser y CEAQ, 2017).

Basalto Querétaro (TAB)

Litología: Se agrupa en esta unidad (TAB en la Figura 40) a los derrames fisúrales, aparatos centrales y conos cineríticos, de composición basáltica, estas rocas tienen una gran cantidad de vesículas y presentan fracturamiento.

Distribución: El Basalto Querétaro sobreyace al Volcanoclastico Querétaro, a la Andesita El Cedro y a la Dacita Obrajuelo y subyace a los depósitos sedimentarios aluviales y lacustres que rellenan la fosa de Querétaro.

Edad: Los basaltos han sido fechados a finales del Mioceno (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001).

Andesita y Basalto pliocénicos (TmtAB)

Litología y espesor: En esta unidad (TpAB en la Figura 40) se agrupan los derrames de basalto y derrames que tienen una composición que va de andesítica a basáltica. El ambiente es de origen continental. El espesor es mayor de los 500 metros debido a que se origina de un aparato volcánico.

Distribución: Su emplazamiento se originó a lo largo de la falla San Miguel de Allende, en su parte meridional. Yacen sobre los sedimentos continentales que rellenan las cuencas, y no hay unidad que los cubra, salvo aluviones, suelos o sedimentos muy recientes.

Edad: El volcán El Jocoque, perteneciente a esta unidad, presenta una edad perteneciente a finales del Plioceno e inicios del Pleistoceno (Nieto-Samaniego *et al.*, 1996; Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001).

Arenas y Conglomerado cenozoicos (ArCg)

Litología y espesor: a esta unidad (ArCg en la Figura 40) se agrupan los sedimentos aluviales y lacustres. Se caracteriza principalmente de areniscas y conglomerados, y en algunos lugares aparecen como margas, lutitas, o lentes de caliza y pedernal.

También se encuentran intercaladas con tobas y material piroclástico. El espesor de esta unidad es variable según la cuenca de que se trate, en los afloramientos de los alrededores de Querétaro, los espesores reportados son de hasta 350 m.

Distribución: Estos sedimentos afloran en las partes bajas del valle. Estos depósitos sedimentarios constituyen el relleno de las depresiones o cuencas continentales del área de estudio.

Edad: La edad de la unidad abarca del Oligoceno al Pleistoceno (Nieto-Samaniego *et al.*, 1996; Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001).

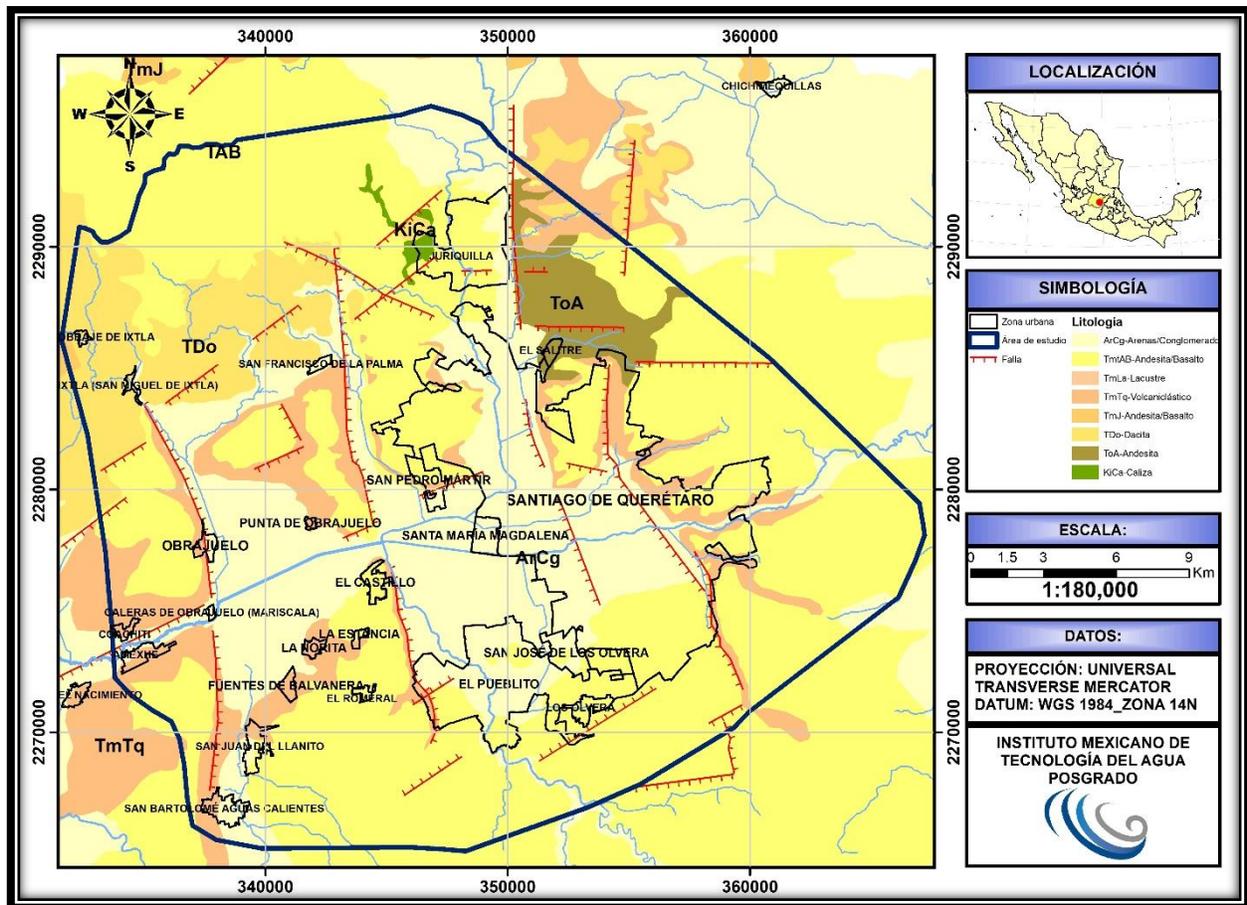


Figura 40. Mapa geológico de la zona de Obrajuelo Guanajuato que muestran las principales unidades litológicas. (Fuente propia: con base a datos de Alanís et al. 2001 y Consejo de Recursos Minerales, 1999).

Se realizó una recopilación de la información estratigráfica de la región de estudio con la finalidad de conocer las capas litológicas del subsuelo. En la Figura 41, se observan dos tipos de rocas, la primera de origen sedimentario constituida por areniscas, conglomerados, sedimentos lacustres y secuencias vulcanoclásticas; y la segunda por rocas de origen volcánico compuesta por basaltos, andesitas, ignimbritas y dacitas.

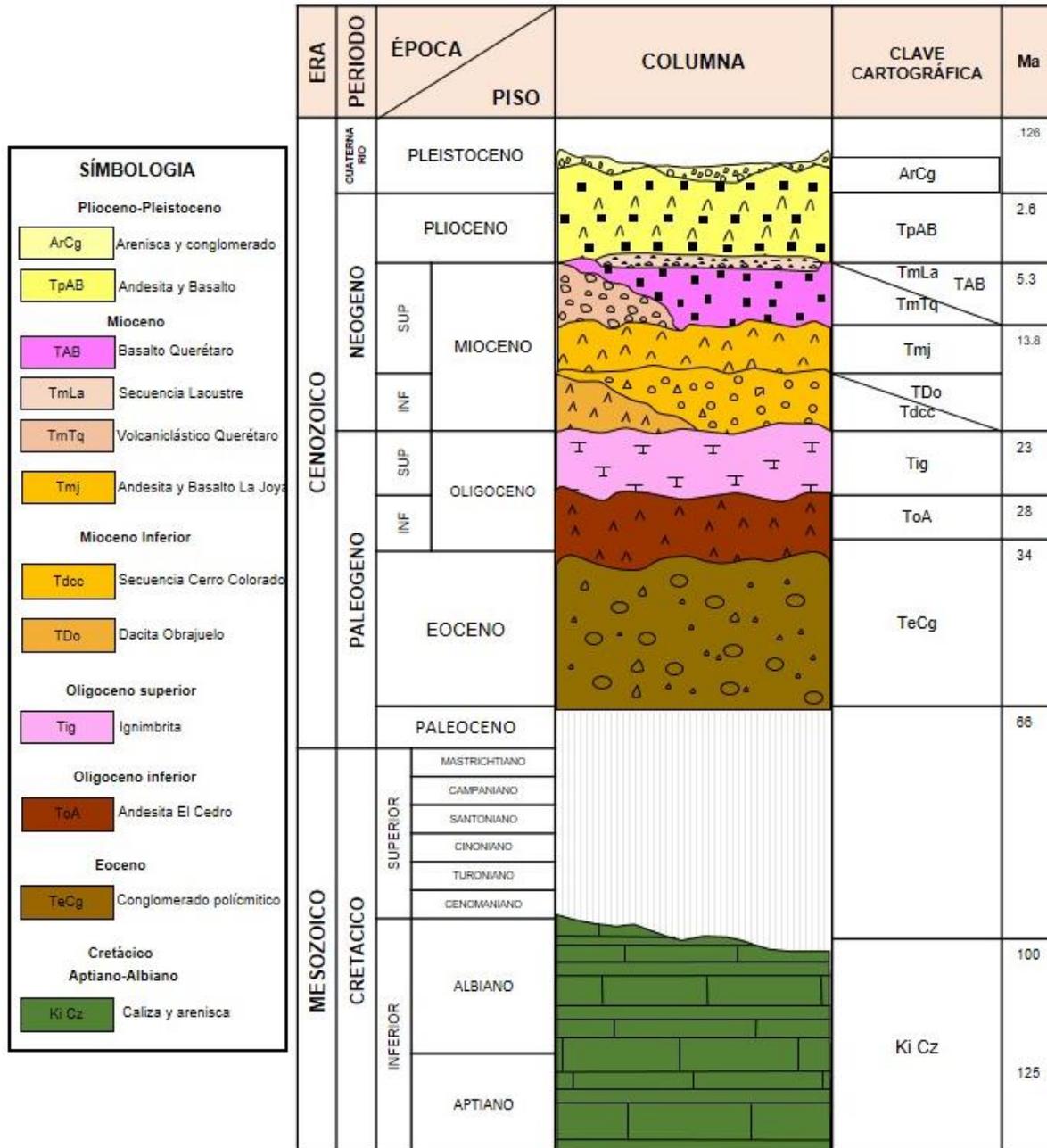


Figura 41. Columna estratigráfica de la zona de Obrajuelo-Querétaro que muestran las principales unidades litológicas (Fuente: elaboración propia con base a datos de Alanís et al. 2001 y Consejo de Recursos Minerales, 1999).

En la Tabla 15, se describe la edad, litología, simbología y mineralogía para cada tipo de roca presente en el área de estudio.

Tabla 15. Composición mineralogía para los diferentes tipos de rocas.

Caracterización geológica			
Edad	Litología	Símbolo	Mineralogía
Pleistoceno -Eoceno	Arenas y conglomerado	ArCg	Cuarzo, plagioclasas, feldespato K, calcita, arcilla, mineral portador de magnesio (auguita, hipersteno y hornblenda), halita
Plesitoceno -Plioceno	Andesita y basalto	TpAB	Plagioclasas, horblenda, piroxeno, silicatos Mg y Fe.
Mioceno	Basalto	TAB	Plagioclasas, horblenda, olivino, piroxeno, silicatos magnesio y hierro
Mioceno	Volcanoclástico	TmTq	Fragmentos volcánicos y pómez
Oligoceno- Mioceno	Secuencia Lacustre	TmLa	Fragmentos arenosos, arcillas y clastos de pómez
Mioceno	Andesita y basalto	Tmj	Plagioclasas, horblenda, olivino, piroxeno, silicatos magnesio y hierro
Mioceno Inferior	Secuencia	Tdcc	Fragmentos de roca andesitas y dacitas.
Mioceno inferior	Dacita	TDo	Fenocristales de andesina, feldespatos, biotitas, anfíboles y cuarzo
Oligoceno	Ignimbrita	Tg	Toba compuesta por fragmentos de roca, fenocristales y vidrio
Oligoceno inferior	Andesita	ToA	Plagioclasas, horblendas y piroxenos, olivino, biotita y cuarzo.
Eoceno	Conglomerado	TeCg	Fragmentos volcánicos de riolitas, andesitas y basaltos, granitos, dioritas y caliza; minerales como calcita, chert y cuarzo
Aptiano- Albiano	Caliza	KiCz	Calcita, aragonito

Fuente: elaboración propia.

4.4.2 Geología Estructural

En el área de estudio se identificaron dos sistemas de fallas de edad cenozoica: el Sistema de fallas de Querétaro y el Sistema Noreste-Suroeste (NE-SW) (Figura 42). Todas estas fallas cortan unidades estratigráficas de edad terciaria (Alanís-Álvarez *et al.*, 2001).

En la Tabla 16 se muestra la síntesis de las características generales de los sistemas de fallas de la zona de estudio que ayudan a definir las entradas o zonas de recarga del agua subterránea.

Tabla 16. Descripción de fallas del área de estudio.

Nombre de la falla	Edad (Ma)			Desplazamiento vertical (m)	Rumbo Dir. Echado	Longitud (Km)
	12-9	8-5	<5			
Sistema de fallas de Querétaro						
Falla Querétaro Norte	x			>100	N00°E/W	10-40*
Falla Querétaro Centro		7-5		50	N00°E/W	15
Falla Querétaro Sur			<5.3	80	N22°W/W	25.5
Falla 5 de Febrero		7-5		100	N22°W/W	14
Falla Tlacote		x		80	N13°W/E	20
Falla San Bartolomé		x		80	N05°W/E	27
Sistema de fallas NE-SW						
Falla Ixtla	x			>>100	N50°E/SE	~30
Falla central		7.5		50	N65°E/SE	22
Falla Sur			<5.3	50	N70°E/N	16

(Fuente: elaboración con base a datos de Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001).

4.4.2.1 Sistema de fallas de Querétaro

El sistema de fallas de Querétaro está compuesto por cuatro fallas paralelas con orientación aproximada norte-sur (N-S). Las fallas principales de este sistema son: la falla Querétaro, la falla 5 de Febrero, la falla Tlacote y la falla San Bartolomé.

4.4.2.1.1 Falla Querétaro (Norte, Centro y Sur)

La falla Querétaro es de tipo normal y tiene una longitud de 61 km; se dividió en tres sectores:

La falla Querétaro-norte, se presenta por el límite poniente del alto topográfico entre San José Iturbide y Santa Rosa de Jáuregui. El escarpe tiene una orientación N-S y se extiende por más de 10 km, se encuentra en contacto con ignimbritas riolíticas de 29.3 Ma y basaltos del Mioceno tardío (10 y 7 Ma), con depósitos sedimentarios pertenecientes a la unidad de Arenisca y Conglomerados del cenozoico. La actividad de la falla fue posterior al Mioceno medio, que es la edad de los basaltos desplazados (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001; López, 1996).

La falla Querétaro-centro, tiene una longitud de 15 km de largo y presenta un desplazamiento vertical de 50 m en lavas del volcán Santa Cruz. Desde el norte de El Salitre hasta Santa Rosa de Jáuregui, la falla es inferida por los desniveles topográficos y por la alineación de fuentes volcánicas del Basalto Querétaro y de la Dacita Obrajuelo (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001).

La falla Querétaro-sur, con una traza de 25.5 km de largo, muestra una orientación N22°W. Esta falla corta a los Basaltos Querétaro y expone al volcanoclásticos Querétaro a lo largo de su escarpe. La roca más joven se desplazada por esta falla que corresponde a las lavas del volcán Cimatarío. El desplazamiento vertical promedio es de 80 m. La falla Querétaro-sur está cortada y limitada por la falla Huimilpan de rumbo N80°E. Esta relación se evidencia por el truncamiento que presenta el escarpe N-S en el costado este del volcán Cimatarío. La actividad de la falla fue en el Mioceno tardío (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001).

4.4.2.1.2 Falla 5 de Febrero

La falla 5 de Febrero es de tipo normal, tiene 14 km de largo, una dirección N-S y un desplazamiento vertical de 100 m. La falla corta a los derrames del Basalto Querétaro fechado en 7.5 Ma. La falla 5 de Febrero se localiza a 5 km al poniente del sector central de la falla de Querétaro. Estas estructuras constituyen un relevo izquierdo entre dos fallas normales, observándose que en la zona del relevo la diferencia de elevación fue suficiente para formar una serie de fallas de orientación E-W con un desplazamiento oblicuo (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001; López, 1996).

4.4.2.1.3 Falla Tlacote

Es una falla de tipo normal, su escarpe se observa por más de 20 km. Está compuesta por dos segmentos separados por la falla Central, con orientación ENE-WSW, cuya expresión topográfica y relaciones de corte indican que es anterior a la falla Tlacote. El desplazamiento vertical fue de 80 m. Tanto en el bloque levantado como en el bloque hundido se encuentra depositado el Basalto Querétaro. La edad de actividad de esta falla es más joven que 7.5 Ma y no afecta a los derrames del dique El Patol de 6.2 Ma. (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001).

4.4.2.1.4 Falla San Bartolomé

La falla se extiende desde los afloramientos de la Dacita Obrajuelo hasta 27 km al sur (Figura 42); tiene como rasgo distintivo la presencia de manantiales de agua caliente y géiser a lo largo de su traza (López, 1996).

La orientación de la falla varía de NNW a N-S y es de tipo normal. El escarpe tiene cerca de 100 m de altura en el sector norte y 50 m en el segmento sur. Estos dos sectores están separados por la falla Central, la cual tiene un rumbo ENE-SSW. A lo largo del bloque levantado se localiza el Basalto Querétaro, mientras que en el bloque hundido aparecen sedimentos de arenas y conglomerado del cenozoico. El desplazamiento máximo de la falla fue arriba de 100 m para el sector norte. La edad de la falla se infiere sincrónica con la falla Tlacote y la falla 5 de Febrero, atendiendo al grado de erosión del escarpe y a las unidades estratigráficas que corta (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001).

4.4.2.2 Sistema de Fallas NE-SW

El sistema de estructuras NE-SW está compuesto por fallas normales y alineamientos de estructuras volcánicas. Las fallas normales están constituidas por longitudes menores que 15 km y escarpes que varían de 30 a 100 m. (Figura 42). El rumbo de las fallas varía de ENE a NE (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001). Dentro del polígono de estudio existen numerosas fallas que pertenecen al sistema de fallas NE-SW, las cuales son: falla Ixtla, falla Central y falla Sur.

4.4.2.2.1 Falla Ixtla

La falla Ixtla tiene una estructura con dirección N50°E y está compuesta por zonas escarpadas que cortan al Basalto y Dacita Querétaro. Sobre este conjunto de fallas se observa un alineamiento de emisiones volcánicas de composición dacítica con dirección NE-SW (Figura 42). El bloque hundido generado por esta falla se depositan sedimentos volcanoclásticos Querétaro, sedimentos aluviales y lacustres (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001).

4.4.2.2.2 Falla Central

La falla Central genera un escarpe de 30 a 50 m de altura, con un rumbo N65°E y buza al SE. En el bloque levantado se encuentra aflorando el Basalto Querétaro. Por otra parte, en el bloque hundido se depositan sedimentos lacustres y aluvión. La falla Central es cortada perpendicularmente por la falla San Bartolomé, Tlacote y termina su intersección con la falla 5 de Febrero (Figura 42). La zona de intersección con las fallas San Bartolomé y Tlacote se generan escarpes de aproximadamente 50 m. Se infiere que la última actividad de la falla se generó posterior al depósito del Basalto Querétaro y anterior a las fallas San Bartolomé, Tlacote y 5 de Febrero (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001).

4.4.2.2.3 Falla Sur

La falla Sur tiene una orientación N70°E y longitudes desde 5 km, estas estructuras cortan al volcán Cimatarío y a la falla Tlacote (Figura 42). En el bloque hundido se depositaron sedimentos lacustres y aluviales. La falla Sur desplaza a la falla Querétaro-sur (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001).

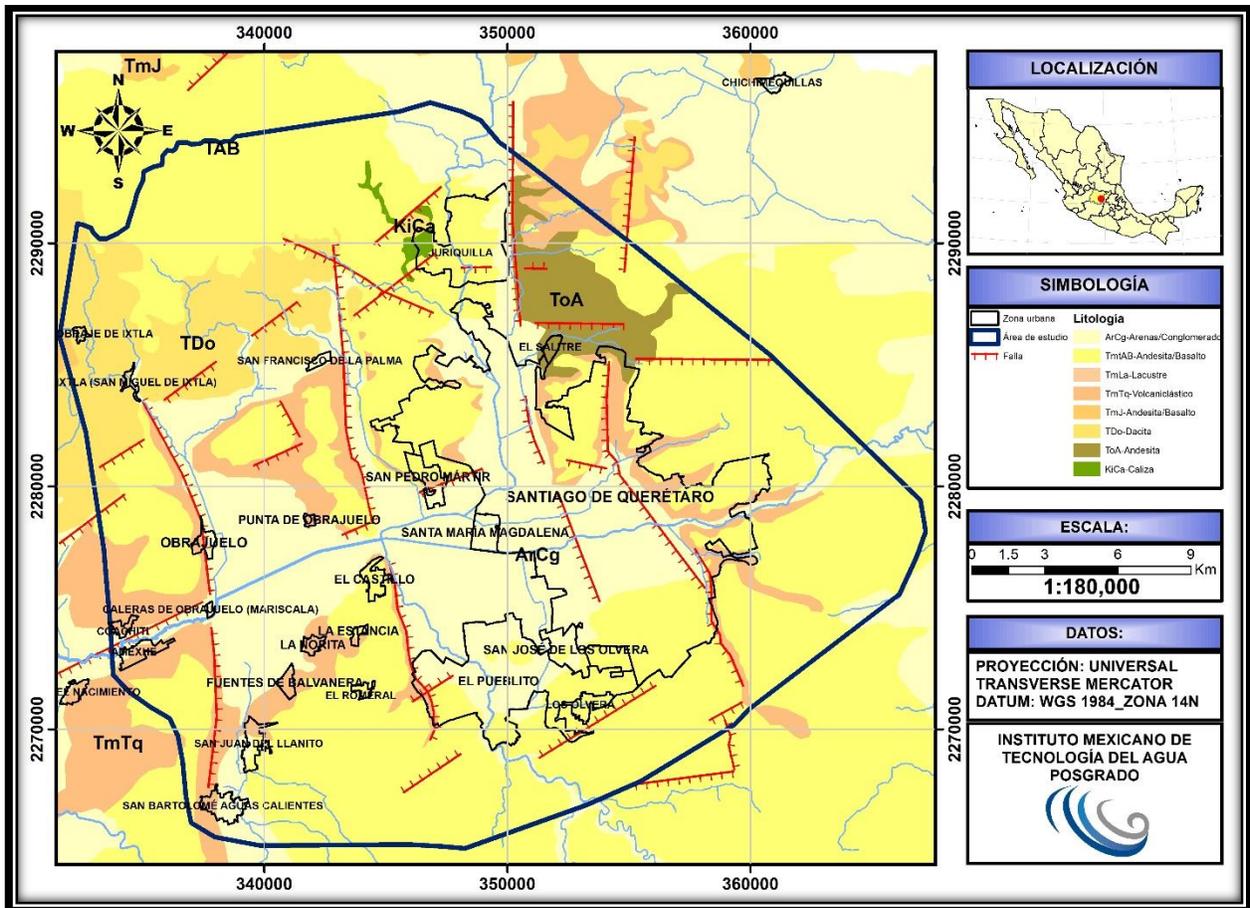


Figura 42. Mapa geológico-estructural de la zona de estudio que muestran las principales fallas y fracturas de la zona de estudio (Fuente propia: con base a datos de Alanís et al. 2001 y Consejo de Recursos Minerales, 1999).

CAPITULO V.

5. RESULTADOS

5.1 Análisis piezométrico

5.1.1 Profundidad del nivel estático y dirección del flujo

En la Tabla 17, se presentan los datos piezométricos de la medición de 30 pozos monitoreados en el año 2017 de la zona de estudio.

Tabla 17. Resultados de las mediciones piezométricas tomadas en campo.

No. de Pozo	Fecha	Coordenadas		Nivel del terreno (msnm)	Nivel Piezométrico (msnm)	Profundidad del nivel estático (m)
		x	y			
1	oct-17	343449	2271929	1830	1663	167
2	oct-17	344440	2279792	1814	1660	154
3	oct-17	344744	2278574	1803	1669	134
4	oct-17	345265	2281054	1812	1664	148
5	oct-17	345600	2289242	1931	1825	106
6	oct-17	346893	2279228	1802	1668	134
7	oct-17	347166	2292086	1940	1859	81
8	oct-17	348247	2273979	1809	1669	140
9	oct-17	349450	2272271	1816	1657	159
10	oct-17	349818	2284988	1822	1757	65
11	oct-17	350536	2274107	1809	1669	140
12	oct-17	350834	2276380	1808	1669	139
13	oct-17	351229	2280079	1809	1686	123
14	oct-17	351744	2280781	1812	1687	125
15	oct-17	351815	2272915	1813	1668	145
16	oct-17	351991	2278559	1811	1681	130
17	oct-17	352500	2277300	1815	1677	138
18	oct-17	352618	2279064	1815	1689	126
19	oct-17	353095	2277032	1818	1674	144
20	oct-17	355293	2278744	1830	1758	72
21	oct-17	358102	2278755	1842	1795	47
22	oct-17	339732	2275502	1789	1706	83
23	oct-17	343702	2276191	1795	1668	127
24	oct-17	344581	2276298	1811	1668	143
25	oct-17	338615	2280572	1803	1760	43
26	oct-17	339073	2277804	1793	1702	91
27	oct-17	341590	2267679	1842	1756	86
28	oct-17	343505	2274043	1812	1673	139
29	oct-17	339441	2270808	1794	1718	76
30	oct-17	340682	2272148	1794	1684	110

5.1.1.1 Profundidad del nivel del agua subterránea

Del monitoreo de los 30 pozos, se realizó un mapa piezométrico a nivel regional con la finalidad de determinar la profundidad y la dirección del flujo subterráneo (Figura 45). De la línea de color café de la Figura 45 y de los datos de la Tabla 17 se realizó el gráfico (Figura 43) donde se aprecia una profundidad mínima de 43 m, una máxima de 167 m y una profundidad media de 117 m.

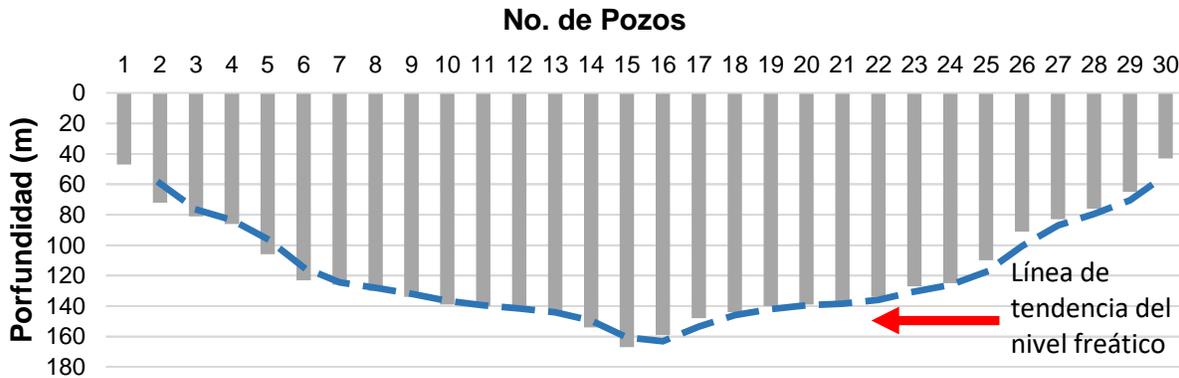


Figura 43. Niveles de profundidad de los 30 pozos monitoreados en el área de estudio.

De los 19 pozos y el manantial termal muestreados, se obtuvieron las profundidades de solo 18 pozos mediante el mapa piezométrico de la Figura 45. Se presentó una profundidad mínima de 30 m y una máxima de 200 m, con una profundidad media de 114 m. Mediante la línea de sección (color café) de la Figura 45, se realizó la Figura 44, donde se observa un abatimiento hacia el pozo el Castillo, Ejido Romeral y Poniente 1.

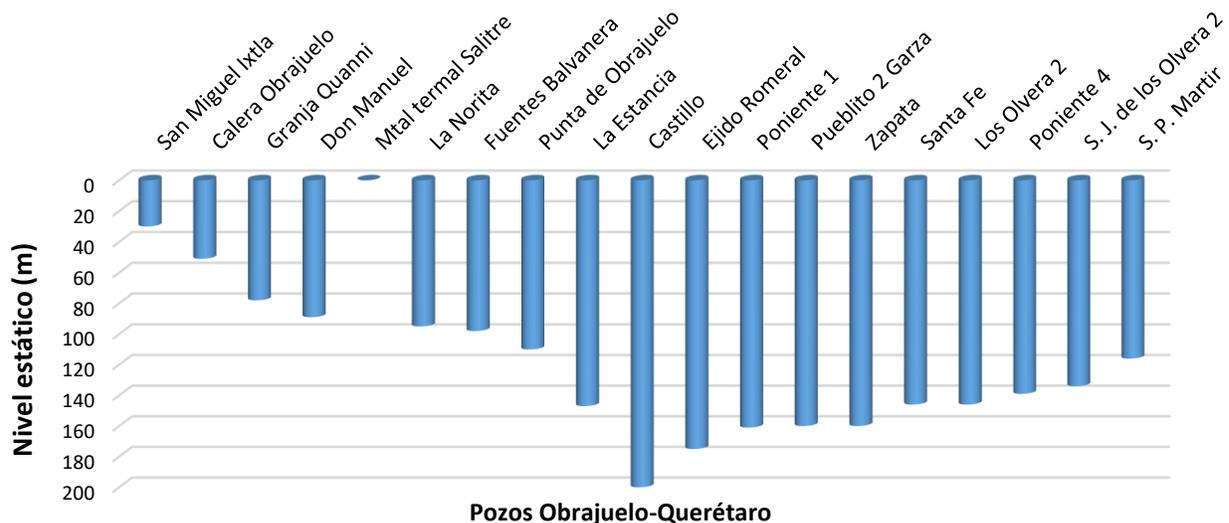


Figura 44. Niveles de profundidad de los pozos muestreados para el análisis hidrogeoquímico.

5.1.1.2 Dirección de flujos subterráneos

Con base a los datos de la Tabla 17, se realizó el mapa piezométrico del monitoreo del año 2017 de la zona de estudio, con la finalidad de demostrar la dirección de los flujos subterráneos. En la Figura 45, se observa un cono de abatimiento hacia las localidades de Santa María Magdalena y el Pueblito en el Estado de Querétaro y el Castillo en el Estado de Guanajuato.

El descenso del agua subterránea en la zona centro del área de estudio, es provocada por la intensa explotación de los pozos para el abastecimiento público urbano, agrícola e industrial. Se ha estimado un abatimiento promedio de 1 a 4 m/año para el periodo de 1940 al 2003 (CEAQ, 2002; Gutiérrez *et al.*, 2002; Carreón *et al.* 2005; Herrera *et al.* 2007).

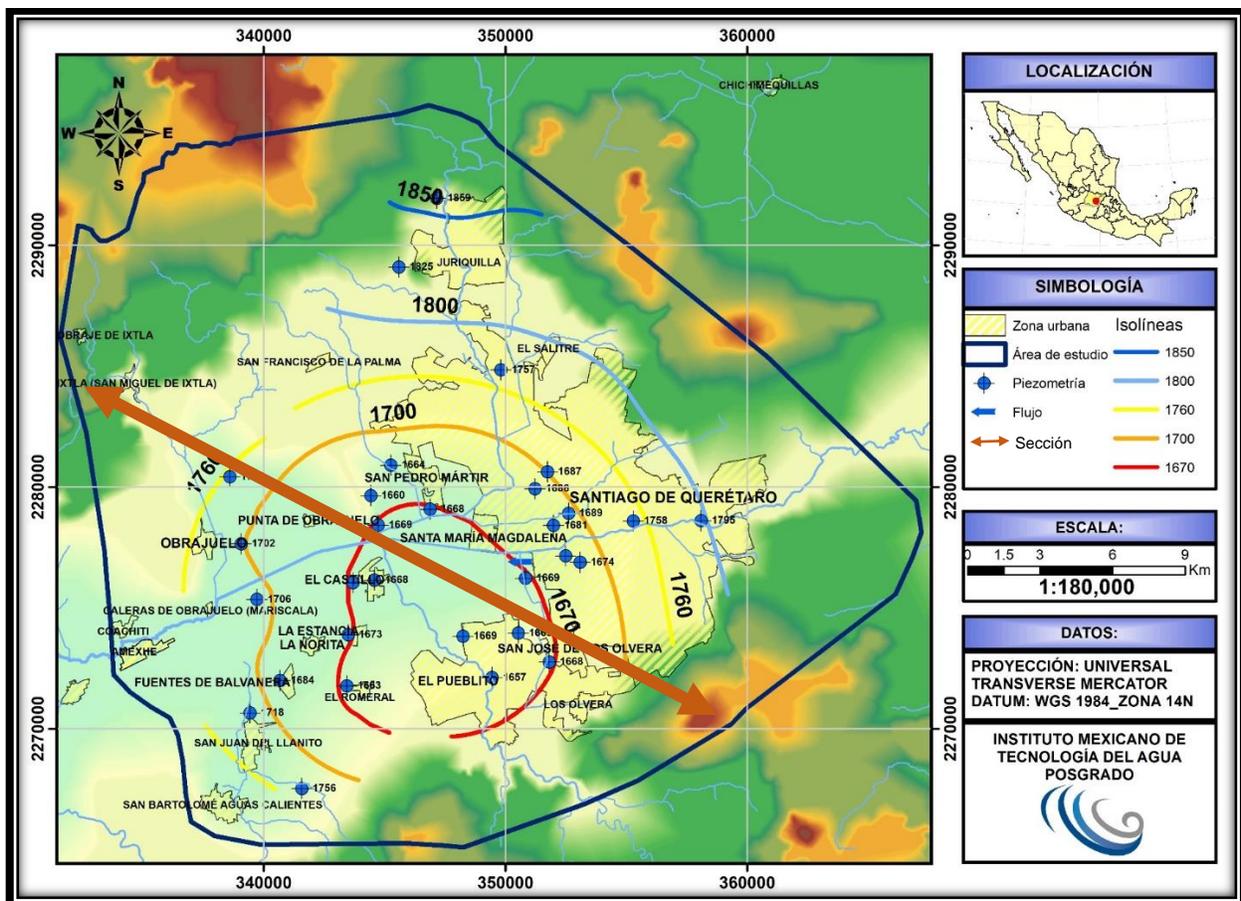


Figura 45. Mapa piezométrico de la zona comprendida de Obrajuelo-Querétaro. (Fuente: elaboración propia con base a datos de INEGI, 2010 a y b).

5.2 Resultados y ubicación de las muestras de agua

Tabla 18. Resultados de los parámetros fisicoquímicos tomados *in situ*.

No.	POZO	X	Y	Temperatura	pH	Eh	C.E.	OD	Solidos Disueltos
				(°C)		(mV)	(µS/cm)	(mg/L)	mg/L
1	San Miguel Ixtla	334496	2284596	29.9	7.4	-	726	3.7	236.9
2	Castillo 150m	343704	2276188	-		-	505.3	-	170
	Castillo 200m	343704	2276188	-		-	417.8	-	146.8
3	Granja Quanni	339712	2280751	40.5	7.9		472	2.7	177
4	La Estancia	343524	2274078	27.3	7.7	-	516	3.5	181.8
5	Fuentes Balvanera	340697	2272157	33.1	7.5	-	1090	3.8	451.8
6	Calera Obrajuelo	337812	2275314	32.1	7.4	519	772	3.7	295
7	Punta de Obrajuelo	341712	2278761	31.2	7.5	202	543	5.6	166.3
8	La Norita	341389	2273718	43.7	7.0	-207	1080	0.9	413.5
9	Don Manuel	339073	2277804	30.4	7.7	105	659	6.4	220.2
10	Manantial termal Salitre	338495	2271335	100	9	-370	989	0.8	-
11	Santa Fe	349378	2276970	29	7.5	343	677	3.3	223.6
12	Poniente 4	350248	2276663	29.2	7.6	247.6	634	4.5	203.2
13	San Pedro Mártir 1-BIS	346894	2280236	32.2	7.5	297	537	4.4	165.1
14	Ejido Romeral	344153	2272218	29.8	7.8	256	730	4.8	283.7
15	Pueblito 2 Garza	349448	2272279	29.5	7.7	296	665	5.7	210
16	San José de los Olvera 2	352506	2273910	31.6	7.7	175	510	4.6	178.3
17	Los Olvera 2	351534	2271793	38	7.8	163	652	5.1	232.4
18	San Francisco Corregidora	353751	2267773	27.9	8.0	193	501	5.2	133.5
19	Poniente 1	347775	2275764	30.1	7.7	172	575	3.2	170.1
20	Zapata	349406	2274513	29.4	7.8	175.8	617	4.5	211.3

Tabla 19. Resultados de los análisis de laboratorio de los elementos mayoritarios.

No	POZO	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	San Miguel Ixtla	60.27	7.45	31.61	49.51	336.7	18.6	11.68	56.4
2	Castillo 150m	27.96	8.31	3.4	87.53	265.8	27.8	8.12	4.18
	Castillo 200m	17.35	6.18	1.93	80.56	198.3	26.2	10.67	0.28
3	Granja Quanni	13.1	5.75	1.52	89.23	179	42.1	11.33	11.5
4	La Estancia	33.74	12.13	10.45	53.3	187.3	32.7	15.58	22.4
5	Fuentes Balvanera	46.82	18.04	25.84	121.7	253.3	93.9	121.2	9.74
6	Calera Obrajuelo	43.06	12.06	12.48	89.96	197.9	82	45.05	25.8
7	Punta de Obrajuelo	31.66	11.61	10.86	57.61	213.8	35.4	11.13	27.9
8	La Norita	13.87	16.87	3.49	201.4	319	53.5	92.98	0.5
9	Don Manuel	43.31	12.41	13.5	64.67	205.7	55.3	22.63	30
10	Manantial termal Salitre	0.8	12.29	0.36	200.4	267.5	40.6	89.68	0.29
11	Santa Fe	44.61	12.35	17.95	73.47	275.3	40.2	27.32	23.4
12	Poniente 4	42.47	12.2	15.14	64.52	248.4	37.5	24.31	22.6
13	San Pedro Mártir 1-BIS	33	11.23	10.69	57.36	226.4	35.7	9.96	24
14	Ejido Romeral	44.14	15.44	19.9	78.45	235.2	90.5	25.47	32.9
15	Pueblito 2 Garza	58.01	14.72	18.18	50.68	269.7	32.6	22.42	52.9
16	San José de los Olvera 2	31.83	11.36	9.48	52.76	154.5	49.1	16.03	27.6
17	Los Olvera 2	17.33	5.23	3.8	112.2	58.92	59.9	21.83	44.9
18	San Francisco Corregidora	31.44	14.18	9.73	54.76	248.6	15.7	5.63	3.51
19	Poniente 1	39.11	12.17	11.77	59.05	263.1	29.4	13.13	16.2
20	Zapata	45.53	12.64	12.95	56.84	197	50.6	22.88	35.9

Tabla 20. Resultados de los análisis de laboratorio de los elementos minoritarios y traza.

No	POZO	Si ⁴⁺	S	Al ³⁺	As	B ³⁺	Ba ²⁺	Be ²⁺	Cd ²⁺	Cu ²⁺	F ⁻	Fe	Li ⁺	Mn ²⁺	Ni ²⁺	Pb ²⁺	Sr ²⁺	V	Zn ²⁺
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	San Miguel Ixtla	36.25	6.38	0.007	<l.c.	0.027	0.011	<l.c.	<l.c.	0.002	0.161	<l.c.	0.026	<l.c.	0.018	0.011	0.617	0.030	0.513
2	Castillo 150m	44.21	9.90	0.047	<l.c.	1.024	0.019	<l.c.	0.387	0.090	0.437	0.479	0.264	0.013	0.023	0.018	0.213	0.020	0.154
	Castillo 200m	28.32	9.37	0.018	<l.c.	1.142	0.016	<l.c.	0.553	0.089	0.693	1.102	0.211	0.032	0.019	0.016	0.127	<l.c.	0.206
3	Granja Quanni	37.67	15.28	0.021	<l.c.	1.116	0.004	<l.c.	<l.c.	0.003	0.835	0.013	0.159	<l.c.	0.018	0.013	0.090	0.034	0.064
4	La Estancia	35.83	11.60	0.005	<l.c.	0.356	0.005	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.516	<l.c.	0.094	<l.c.	0.017	0.010	0.240	0.025	0.277
5	Fuentes Balvanera	37.81	27.39	0.007	<l.c.	11.370	0.010	<l.c.	<l.c.	<l.c.	1.848	0.006	0.282	<l.c.	0.017	0.011	0.723	0.042	0.236
6	Calera Obrajuelo	35.02	28.68	0.005	<l.c.	2.579	0.006	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.748	<l.c.	0.196	<l.c.	0.017	0.009	0.404	0.026	0.547
7	Punta de Obrajuelo	34.24	13.49	0.008	<l.c.	0.553	0.010	<l.c.	<l.c.	0.020	0.424	0.002	0.095	<l.c.	0.016	0.011	0.373	0.037	0.187
8	La Norita	22.26	19.86	0.019	0.053	17.840	0.129	0.0008	<l.c.	<l.c.	11.36	0.637	0.915	0.035	0.010	<l.c.	0.225	<l.c.	0.123
9	Don Manuel	33.22	22.05	0.015	<l.c.	0.471	0.020	<l.c.	<l.c.	0.002	0.312	0.010	0.114	<l.c.	0.015	0.010	0.491	0.031	0.101
10	Manantial termal Salitre	100.33	275.27	0.342	<l.c.	19.480	0.002	0.001	<l.c.	<l.c.	23.09	0.012	1.399	<l.c.	0.045	0.023	0.057	<l.c.	0.295
11	Santa Fe	36.20	14.49	0.010	<l.c.	0.360	0.019	<l.c.	<l.c.	0.002	0.774	0.004	0.218	<l.c.	0.017	0.012	0.341	0.022	0.621
12	Poniente 4	38.39	13.96	0.015	<l.c.	0.315	0.005	<l.c.	<l.c.	0.002	0.587	0.009	0.158	<l.c.	0.018	0.010	0.287	0.023	0.506
13	San Pedro Mártir 1-BIS	32.34	12.94	0.017	<l.c.	0.303	0.018	<l.c.	<l.c.	0.003	0.430	0.006	0.098	<l.c.	0.015	0.008	0.412	0.036	0.388
14	Ejido Romeral	34.43	34.79	0.009	<l.c.	0.776	0.010	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.648	0.003	0.122	<l.c.	0.015	0.010	0.392	0.036	0.357
15	Pueblito 2 Garza	38.31	11.74	0.007	<l.c.	0.184	0.010	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.221	<l.c.	0.078	<l.c.	0.018	0.009	0.476	0.020	0.411
16	San José de los Olvera 2	36.98	17.52	0.005	<l.c.	0.240	0.003	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.573	<l.c.	0.091	<l.c.	0.018	0.010	0.222	0.029	0.329
17	Los Olvera 2	33.89	23.07	0.007	<l.c.	0.760	0.001	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.481	0.002	0.064	<l.c.	0.014	0.009	0.133	0.035	0.405
18	San Francisco Corregidora	33.95	5.23	0.009	<l.c.	0.093	0.022	<l.c.	<l.c.	0.003	0.256	<l.c.	0.036	<l.c.	0.017	0.010	0.333	0.030	0.432
19	Poniente 1	37.91	10.86	0.004	<l.c.	0.285	0.010	<l.c.	<l.c.	0.002	0.536	<l.c.	0.120	<l.c.	0.017	0.011	0.259	0.027	0.584
20	Zapata	37.64	19.52	0.005	<l.c.	0.281	0.008	<l.c.	<l.c.	0.002	0.548	<l.c.	0.117	<l.c.	0.018	0.010	0.285	0.026	0.437

* <l.c.: límite de cuantificación

El muestreo se realizó en el periodo de octubre del 2017 y abril del 2018. Donde 19 fueron de pozos de agua y un manantial termal. Los puntos de muestro del agua subterránea se ubican en los municipios de Apaseo el Alto y Apaseo el grande en el Estado de Guanajuato; y en el municipio de Santiago de Querétaro y Corregidora para el Estado de Querétaro. En la Figura 46 se muestra el mapa de la ubicación geográfica de los puntos de muestreo.

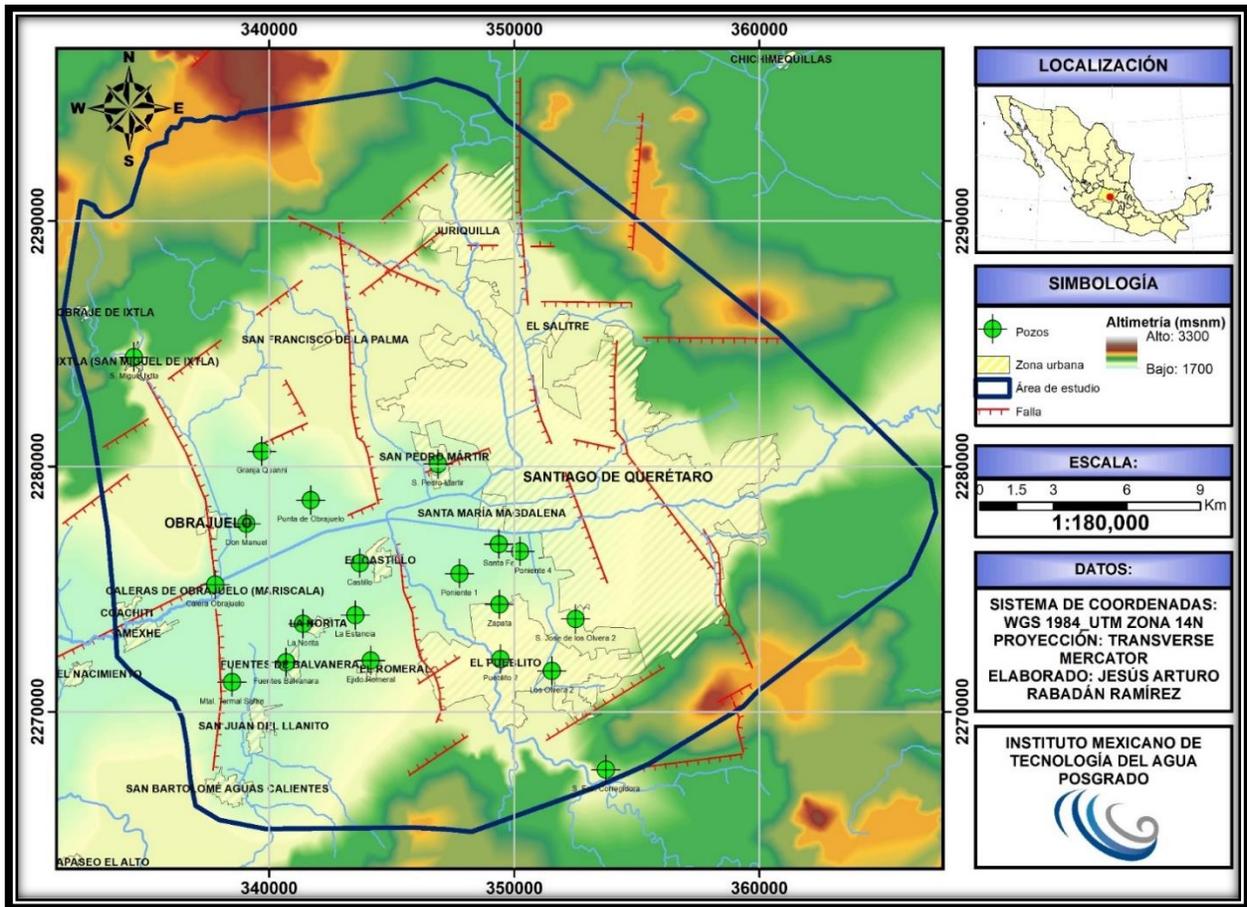


Figura 46. Mapa de la ubicación espacial de los pozos.
(Fuente elaborada con datos vectoriales de INEGI 2010 a y b).

5.3 Hidrogeoquímica

5.3.1 Balance iónico (cálculo del error)

De los resultados obtenidos de los análisis químicos de las muestras de agua, se determinó la confiabilidad de los cálculos del laboratorio, basándose en el principio de la electroneutralidad mediante el cálculo del error del balance iónico, a través de la expresión matemática de Freeze y Cherry (1979). Por lo tanto, el error del balance iónico de las muestras está en un rango del 1 al 10%, que de acuerdo a Custodio y Llamas (2001), un error de equilibrio de carga menor o igual a 10% se considera aceptable (Tabla 21).

$$\% \text{ de Error} = \frac{\sum \text{aniones} - \sum \text{cationes}}{\sum \text{aniones} + \sum \text{cationes}} * 100$$

Tabla 21. Resultados del porcentaje de error del balance iónico de las 21 muestras del área de estudio.

No.	Pozo	Suma de cationes	Suma de aniones	% Error (*100)
1	San Miguel Ixtla	7.95	7.15	5.3
2	Castillo 150m	5.69	5.23	4.2
3	Castillo 200m	4.69	4.10	6.6
4	Granja Quanni	4.81	4.32	5.4
5	La Estancia	5.17	4.55	6.4
6	Fuentes Balvanera	10.22	9.68	2.7
7	Calera Obrajuelo	7.40	6.64	5.4
8	Punta de Obrajuelo	5.28	5.01	2.6
9	La Norita	10.17	8.97	6.3
10	Don Manuel	6.40	5.64	6.3
11	Manantial termal Salitre	9.10	7.76	7.9
12	Santa Fe	7.21	6.50	5.2
13	Poniente 4	6.48	5.90	4.7
14	San Pedro Mártir 1-BIS	5.31	5.12	1.8
15	Ejido Romeral	7.65	6.99	4.5
16	Pueblito 2 Garza	6.97	6.58	2.9
17	San José de los Olvera 2	4.95	4.45	5.3
18	Los Olvera 2	6.19	3.55	27.1
19	San Francisco Corregidora	5.11	4.62	5.1
20	Poniente 1	5.80	5.56	2.1
21	Zapata	6.13	5.51	5.4

5.3.2 Familias de agua

Se determinaron dos tipos de familias de aguas, esto de acuerdo a los resultados obtenidos del análisis de los elementos mayoritarios (Tabla 22). Sin embargo, la muestra del pozo los Olvera 2 presenta un agua sulfatada sódica (Na-SO_4^{2-}), ya que se considera una muestra atípica debido a su alto porcentaje de error en el balance iónico, provocado por un posible error analítico o de muestreo.

Tabla 22. Familia de aguas y tipos de flujo.

No	Pozo	Familia o facie	Tipo de Flujo
1	San Miguel Ixtla	Ca-HCO_3^-	Local
2	Castillo 150m	Na-HCO_3^-	Intermedio
	Castillo 200m	Na-HCO_3^-	Intermedio
3	Granja Quanni	Na-HCO_3^-	Intermedio
4	La Estancia	Na-HCO_3^-	Intermedio (Mezcla de agua)
5	Fuentes Balvanera	Na-HCO_3^-	Regional
6	Calera Obrajuelo	Na-HCO_3^-	Intermedio
7	Punta de Obrajuelo	Na-HCO_3^-	Intermedio (Mezcla de agua)
8	La Norita	Na-HCO_3^-	Intermedio
9	Don Manuel	Na-HCO_3^-	Local (Mezcla de agua)
10	Manantial termal Salitre	Na-HCO_3^-	Intermedio/Regional
11	Santa Fe	Na-HCO_3^-	Intermedio (Mezcla de agua)
12	Poniente 4	Na-HCO_3^-	Local (Mezcla de agua)
13	San Pedro Mártir 1-BIS	Na-HCO_3^-	Intermedio (Mezcla de agua)
14	Ejido Romeral	Na-HCO_3^-	Local (Mezcla de agua)
15	Pueblito 2 Garza	Ca-HCO_3^-	Local
16	San José de los Olvera 2	Na-HCO_3^-	Intermedio (Mezcla de agua)
17	Los Olvera 2	Na-SO_4^{2-}	Regional
18	San Francisco Corregidora	Na-HCO_3^-	Intermedio (Mezcla de agua)
19	Poniente 1	Na-HCO_3^-	Local (Mezcla de agua)
20	Zapata	Na-HCO_3^-	Local (Mezcla de agua)

De acuerdo al diagrama de Piper, se determinaron dos familias de agua: Bicarbonatada sódica (Na-HCO_3^-) y Bicarbonatada cálcica (Ca-HCO_3^-) como se muestra en la Figura 47.

El orden de abundancia de los cationes mayoritarios fue de $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, mientras que para los aniones mayoritarios fue de $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$, estos valores permiten observar el tiempo de residencia y la evolución del agua subterránea, que, de acuerdo a la literatura, indica una secuencia normal de un agua de reciente infiltración, de: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$.

5.3.2.1 Familia Bicarbonatada sódica

La facie bicarbonatada-sódica (Na-HCO_3^-) representa el 85.71% del total de las muestras. En ella se encuentran el pozo el Castillo, la Granja Quanni, La Estancia, Fuentes Balvanera, Calera Obrajuelo, Punta de Obrajuelo, La Norita, Don Manuel, Santa Fe, Poniente 4, San Pedro Mártir, Ejido Romeral, San José de los Olvera 2, San Francisco Corregidora, Poniente 1, Zapata y el manantial termal Salitre.

La predominancia de los bicarbonatos sódicos se debe a la posible disolución de rocas sódicas y volcánicas localizadas en la zona de estudio. El aporte del sodio se debe a la disolución de minerales como plagioclasas y feldespatos de composición sódica y se genera el proceso de intercambio catiónico, donde el calcio es reemplazado por el sodio.

5.3.2.2 Familia Bicarbonatada Cálcica

La segunda facie corresponde a la bicarbonatada-cálcica (Ca-HCO_3^-) y corresponde el pozo San Miguel Ixtla y Pueblito 2. Este tipo de aguas por lo general representan aguas relativamente jóvenes o de reciente infiltración. Este flujo local se recarga principalmente en las zonas altas del área de estudio.

Para la interpretación de los iones mayoritarios se utilizaron los diagramas de Piper y de Stiff, ya que permiten la clasificación de las muestras de agua e identificar los tipos de flujos subterráneos y procesos hidrogeoquímicos dominantes. En el diagrama de Piper de la Figura 47, se identificaron tres tipos de flujos: flujo local, intermedio y regional. Además, se demuestra una trayectoria de reacción o zona de mezcla de aguas.

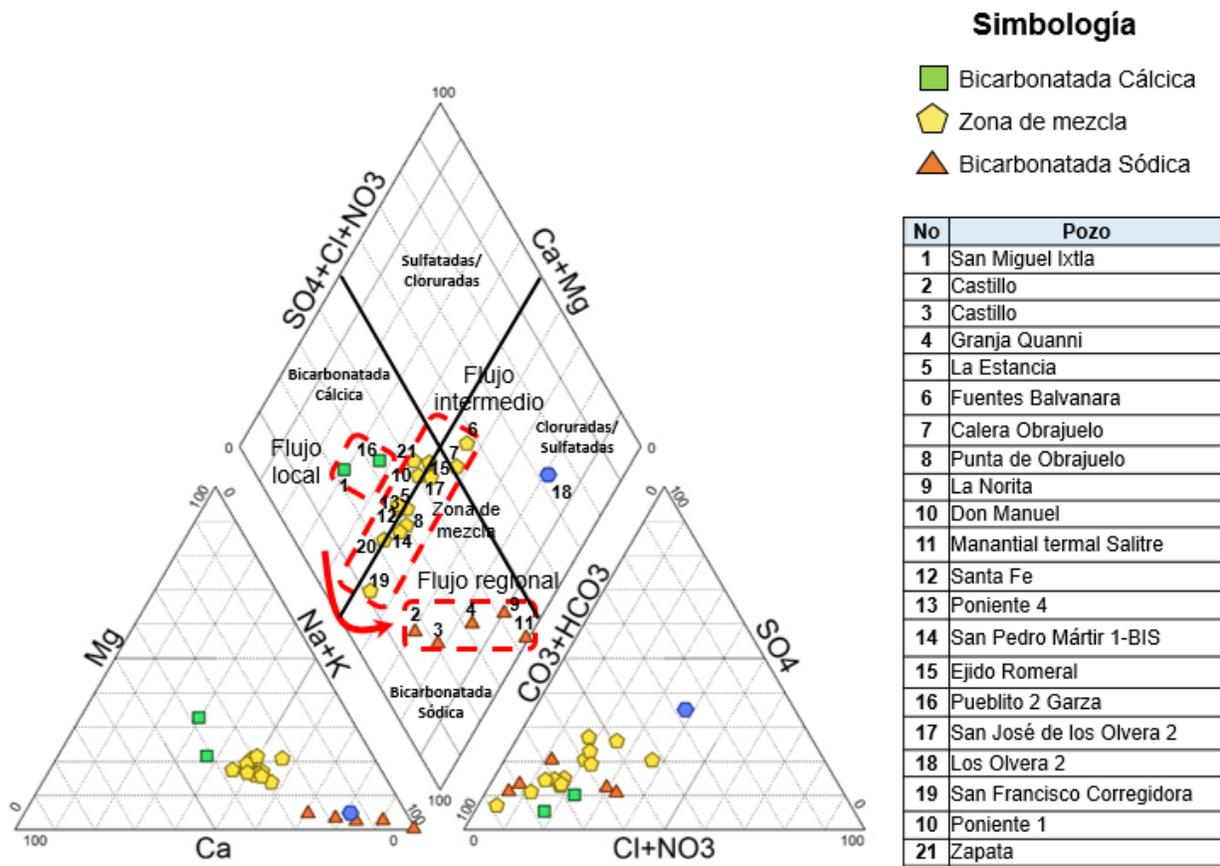


Figura 47. Diagrama de Piper.
(Fuente: Elaboración propia).

Diagramas de stiff

De acuerdo a los resultados del laboratorio (Tabla 19) se realizaron los diagramas de Stiff como se muestran en la Figura 48. Para la realización de estos diagramas se utilizaron los elementos mayoritarios en concentraciones de meq/L. La interpretación se basa en la similitud o forma de los diagramas y se pueden observar cuatro formas distintas. En el grupo A, se presentan dos muestras de agua de reciente infiltración: el pozo San Miguel Ixtla y Pueblito 2 Garza. Para el grupo B y C, las muestras representan flujos intermedios o zonas de mezcla de aguas y para el grupo D, son muestras de flujos regionales con altos contenidos de sodio asociado a fuentes hidrotermales (Figura 48).

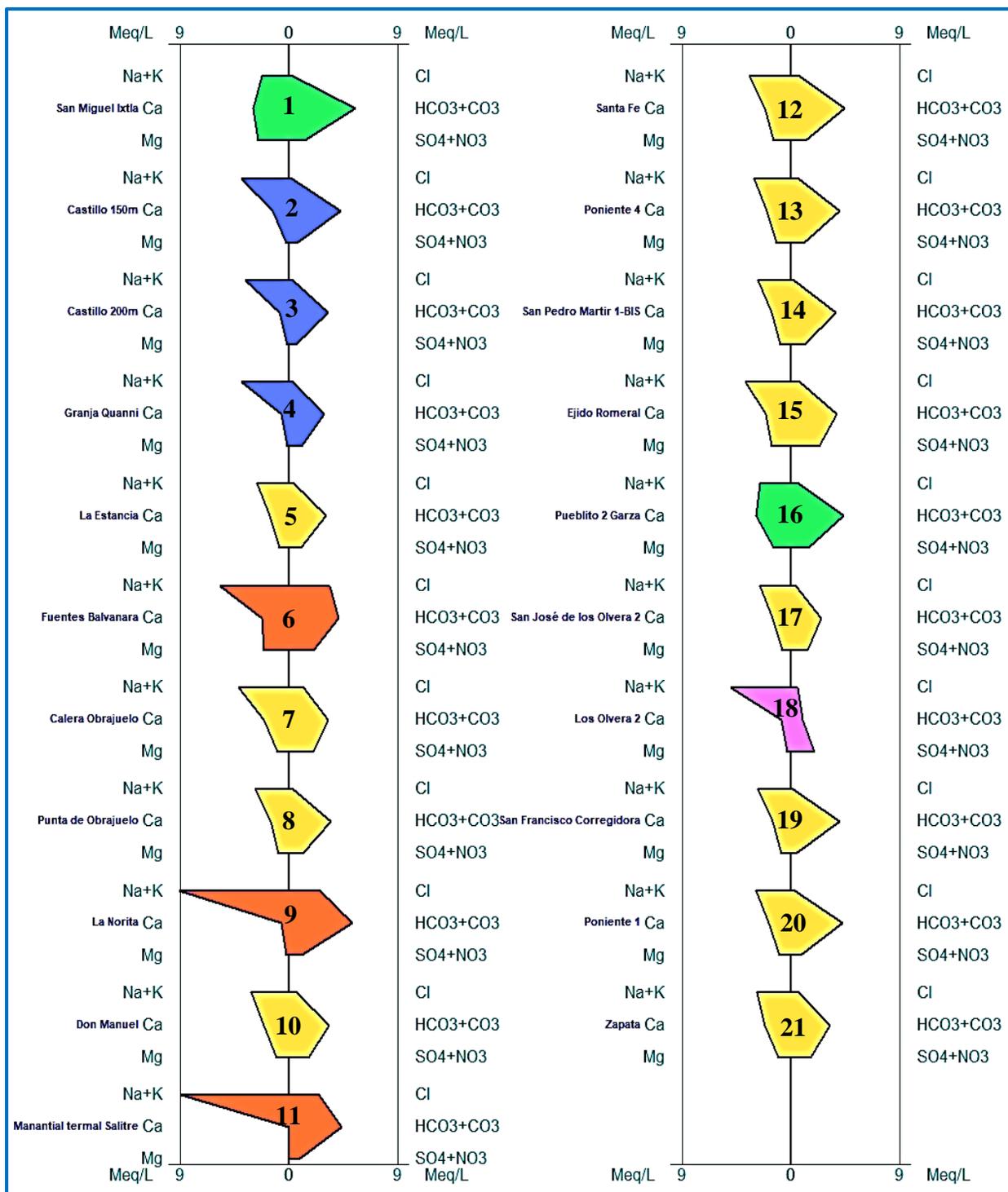


Figura 48. Diagramas de Stiff de las muestras dl agua subterránea de la zona de estudio. (Fuente: Elaboración propia).

En la Figura 49, se muestra el mapa de la distribución espacial de los diagramas stiff, se puede observar que para el grupo A, el pozo de San Miguel Ixtla y Pueblito 2 Garza son lugares de recarga o agua de reciente infiltración. En el grupo B y C, representan flujos intermedios que se caracterizan por aguas tipo bicarbonatadas sódicas. Y para el grupo D, se caracteriza por ser flujos regionales debido a que la zona suroeste del área de estudio presenta evidencias de fuentes hidrotermales. Estos flujos profundos ascienden a través de la falla Obrajuelo y migran hacia la dirección del flujo subterráneo (suroeste-noreste) modificando la composición química del agua del pozo Fuentes Balvanera y La Norita.

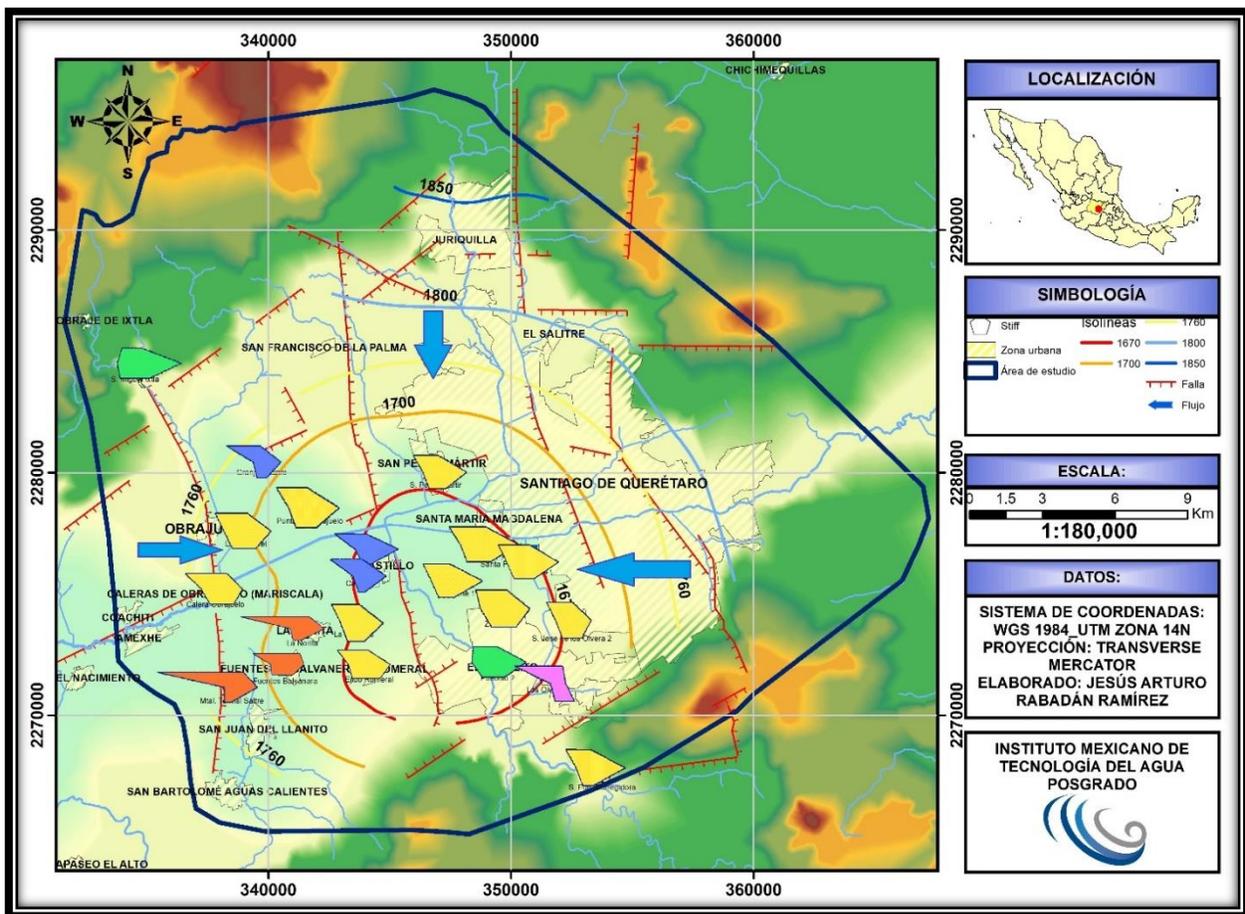


Figura 49. Mapa de la variación espacial de los diagramas de stiff obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.3.3 Índice de Saturación

El análisis del índice de saturación con respecto a diferentes minerales presentes en el área de estudio es un proceso complejo debido a que se debe de tomar en cuenta una serie de factores que afectan a la actividad iónica implicados en el equilibrio de disolución.

El índice de saturación (IS) muestra procesos de disolución-precipitación de minerales. Cuando el índice de saturación es cero ($IS=0$) son aguas en equilibrio. Un índice negativo ($IS=$ Negativo) indica que el agua está subsaturada con respecto a ese mineral (mineral en disolución), cuando el índice es positivo ($IS=$ Positivo) indica que el agua está sobresaturada (mineral en precipitación), por lo tanto, un mineral en contacto con el agua subterránea representa un sistema hidrogeoquímico que consiste de una fase sólida y una fase en solución.

Se determinó el índice de saturación para conocer los iones en disolución-precipitación con respecto a los minerales del medio en el que se contiene el agua subterránea. En este caso en particular, se consideraron los minerales presentes en el agua subterránea que corresponde a rocas volcánicas de composición andesítica y basáltica, constituidas por los siguientes minerales: plagioclasas (albita), feldespatos, micas, calcita y fluorita. En las siguientes figuras se muestran las gráficas con sus respectivos valores de saturación para los diversos minerales obtenidos mediante el programa PHREEQC.

Plagioclasas (Albita)

En la Figura 50, se observan las muestras en un rango de los 0.31 a -2.04, lo que indica que el acuífero está subsaturada (en disolución) con respecto al mineral albita. Para la muestra de San Miguel Ixtla está en equilibrio con respecto a la Albita, sin embargo, para el agua del pozo el Castillo de 150 m y 200 m de profundidad se encuentra sobresaturada y subsaturada respectivamente; debido que a mayor profundidad el mineral la albita tiende a la disolución provocado principalmente por el aumento de la temperatura, entre otras propiedades fisicoquímicas del ambiente.

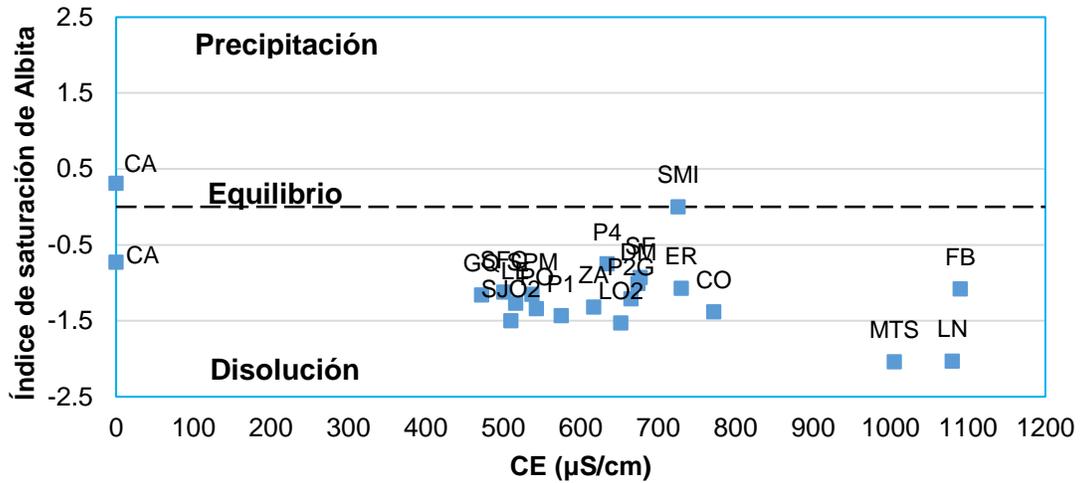


Figura 50. Índice de saturación de la Albita en función de la conductividad eléctrica. (Fuente: Elaboración propia).

Feldespatos K

En la Figura 51, el 80% de las muestras de agua de pozo están en equilibrio con respecto al feldespato potásico. La muestra la Norita y el Manantial termal Salitre el agua se encuentra subsaturada en feldespato k, y la muestra del pozo el Castillo a 150 m de profundidad el agua se encuentra en precipitación el feldespato potásico.

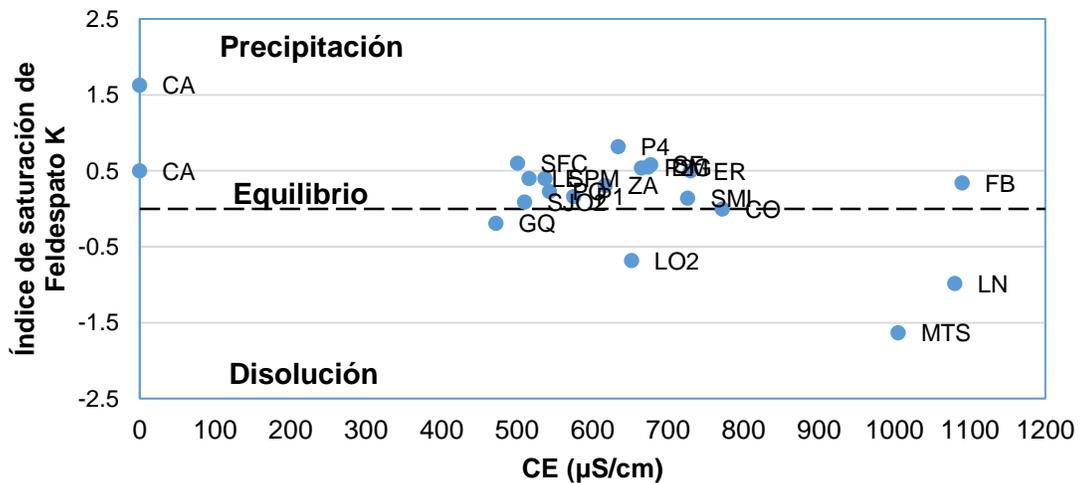


Figura 51. Índice de saturación del feldespato k en función de la conductividad eléctrica. (Fuente: Elaboración propia).

Mica K

Como se puede observar en la Figura 52, la mica potásica presenta una sobresaturación (en precipitación) en todo el acuífero, sin embargo para la muestra del manantial termal el Salitre está en equilibrio debido a las condiciones fisicoquímicas del ambiente hidrotermal.

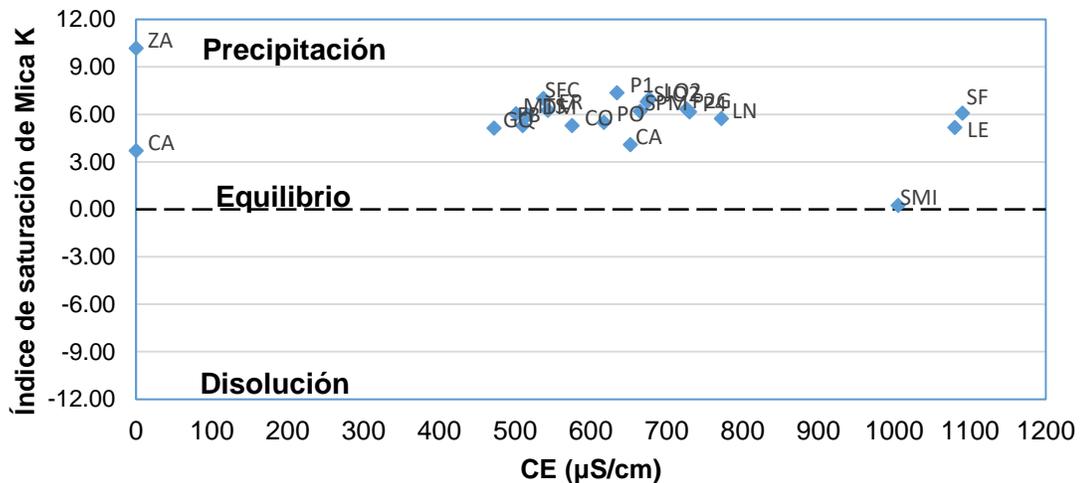


Figura 52. Índice de saturación de la mica k en función de la conductividad eléctrica (Fuente: Elaboración propia).

Calcita

El agua subterránea de la zona de estudio se encuentra en equilibrio con respecto a la calcita (Figura 53). La muestra la Norita y el Castillo a 150 m y 200 m de profundidad se encuentran ligeramente en estado de subsaturación, lo que significa que el agua en esa zona la calcita se encuentra en disolución.

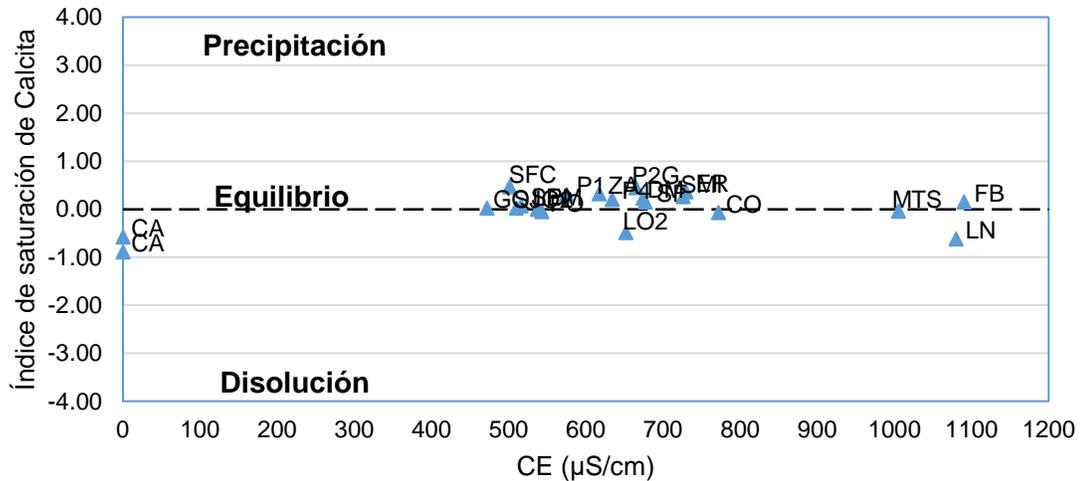


Figura 53. Índice de saturación de la calcita en función de la conductividad eléctrica (Fuente: Elaboración propia).

Fluorita

De acuerdo a los datos reportados de flúor en la zona de estudio, se puede interpretar la presencia de fluorita en el subsuelo y la mayoría de las muestras se encuentran subsaturadas (en disolución) y solo la muestra del pozo la Norita se encuentra en equilibrio como se observa la Figura 54.

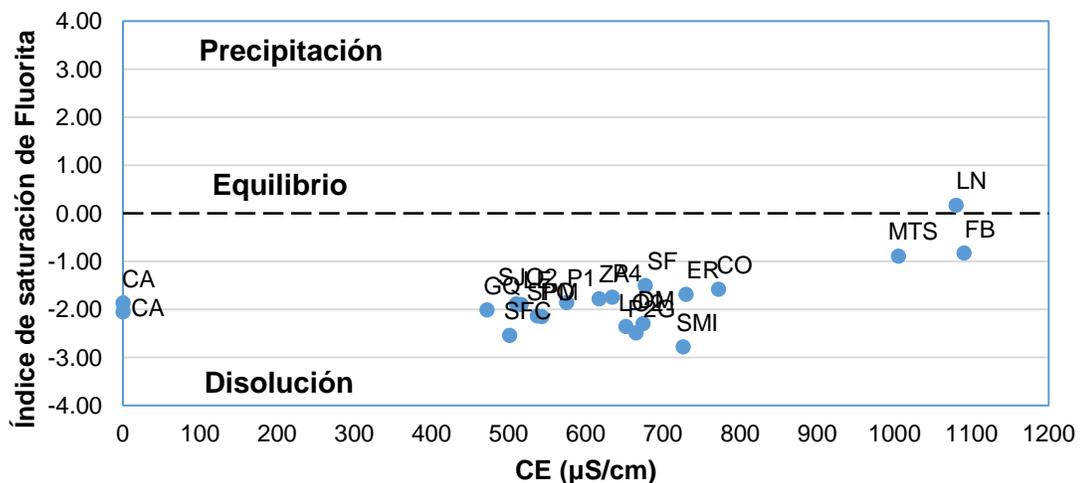


Figura 54. Índice de saturación de la fluorita en función de la conductividad eléctrica (Fuente: Elaboración propia).

5.4 Análisis estadístico y calidad del agua

En la Tabla 23, se muestra el resumen estadístico de los 33 parámetros, de los cuales, 17 se encuentran normados. En ella se observan 9 parámetros (pH, As, Al³⁺, Cd²⁺, F⁻, Fe, Na⁺, NO³⁻ y Pb²⁺) marcados en rojo que sobrepasan los límites máximos permisibles establecidos por la norma NOM-127-SSA1-1994.

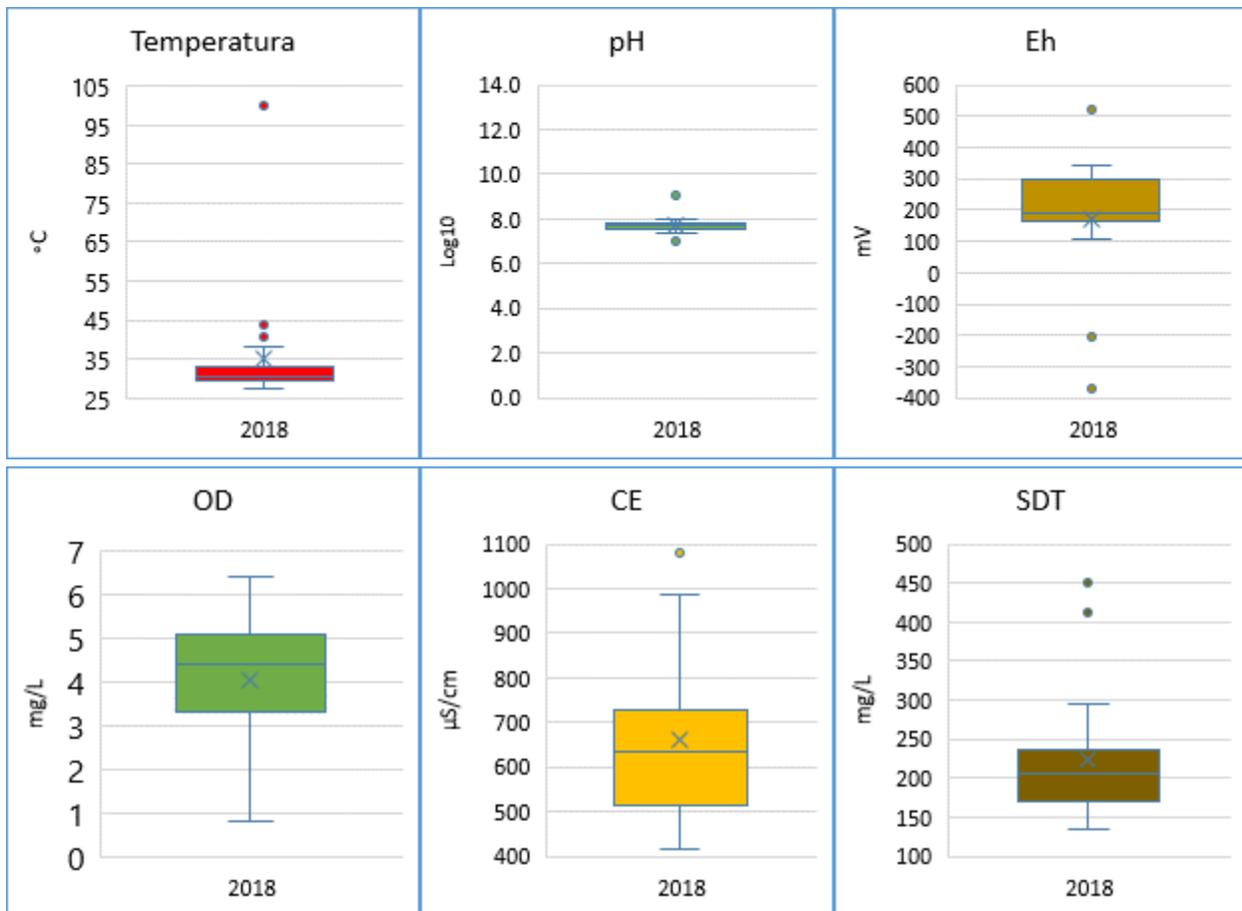
Tabla 23. Resumen estadístico de la composición química de las muestras del agua subterránea.

Parámetro	Unidades	No. de muestras	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	NORMA 127
Temperatura	°C	19	27.3	43.7	35.48	16.21	
pH		19	6.97	9.06	7.7	0.40	6.5 - 8.5
C.E.	μS/cm	19	472	1090	682.95	187.84	
OD	mg/L	19	0.8	6.4	4.021	1.47	
SDT	mg/L	20	133.5	451.8	223.5	82.81	1000
Eh	mV	15	-370	519.1	171.2	213.28	
Dureza	mg/L	20	38.97	280.7	140.09	64.06	500
Ca ²⁺	mg/L	21	0.8	60.27	34.26	15.16	
K ⁺	mg/L	21	5.23	18.04	11.649	3.44	
Mg ²⁺	mg/L	21	0.36	31.61	11.668	8.06	
Na ⁺	mg/L	21	49.51	201.4	83.617	43.80	200
HCO ₃ ⁻	mg/L	21	58.92	336.7	228.64	59.71	
SO ₄ ²⁻	mg/L	21	15.7	93.9	45.20	21.58	400
Cl ⁻	mg/L	21	5.63	121.2	29.95	31.57	250
NO ₃ ⁻	mg/l	21	0.28	56.4	22.52	16.55	10
Si ⁴⁺	mg/L	21	22.26	100.331	38.34	14.83	
Sr ²⁺	mg/L	21	0.057	0.723	0.319	0.17	
Fe	mg/L	13	0.002	1.102	0.176	0.35	0.3
B	mg/L	21	0.005	3.406	0.496	1.01	
F ⁻	mg/L	21	0.161	23.090	2.166	5.35	1.5
Al ³⁺	mg/L	21	0.004	0.342	0.028	0.07	0.2
As	mg/L	1	0.054	0.054	0.054	0.00	0.025
Cu ²⁺	mg/L	12	0.002	0.090	0.018	0.03	2
Pb ²⁺	mg/L	20	0.008	0.023	0.011	0.004	0.01
Mn ²⁺	mg/L	3	0.013	0.036	0.027	0.01	0.15
Zn ²⁺	mg/L	21	0.064	0.621	0.342	0.16	5
Ba ²⁺	mg/L	21	0.001	0.129	0.016	0.03	0.7
Li ⁺	mg/L	21	0.026	1.399	0.231	0.32	
Be ²⁺	mg/L	2	0.001	0.001	0.001	0.0001	
Cd ²⁺	mg/L	2	0.387	0.553	0.470	0.12	0.005
Ni ²⁺	mg/L	21	0.010	0.045	0.018	0.01	
V	mg/L	18	0.020	0.042	0.029	0.01	
S	mg/L	21	5.234	275.271	28.73	56.99	

5.4.1 Parámetros fisicoquímicos

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos se analizaron mediante diagramas estadísticos de cajas y bigotes para identificar los datos atípicos, mediana y valores mínimos y máximos. En la Figura 55, se visualizan los diagramas para cada parámetro indicando la dispersión de los datos y características del agua subterránea.

La temperatura media del agua subterránea es de 35.5°C, sin embargo, la muestra del manantial termal Salitre registro una temperatura máxima de 100°C, esto debido al ambiente geotermal de la zona de estudio. Los valores de pH van de los 7 a los 9.1, demuestran que el agua subterránea es alcalina. Las concentraciones de los sólidos disueltos totales y la conductividad eléctrica, presentan una íntima correlación con los valores mínimos y máximos. Las concentraciones mínimas y máximas del potencial redox y el oxígeno disuelto indican condiciones tanto reductoras como oxidantes respectivamente.



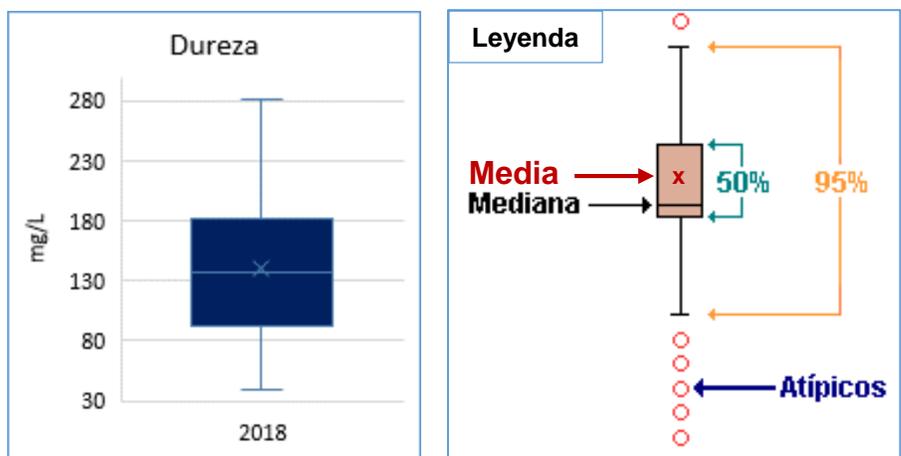


Figura 55. Diagramas de cajas y bigotes para los parámetros fisicoquímicos de las 21 muestras de agua (Fuente: elaboración propia).

5.4.2 Elementos mayores

En la Figura 56, se presentan los diagramas blox-plot para los elementos mayoritarios en miliequivalentes/litro (meq/L) y demuestran que la abundancia de los cationes es $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ y para los aniones es $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$. Los valores mínimos y máximos de cationes y aniones demuestran la heterogeneidad química del agua subterránea, debido a los diferentes procesos hidrogeoquímicos que ocurren en el área de estudio.

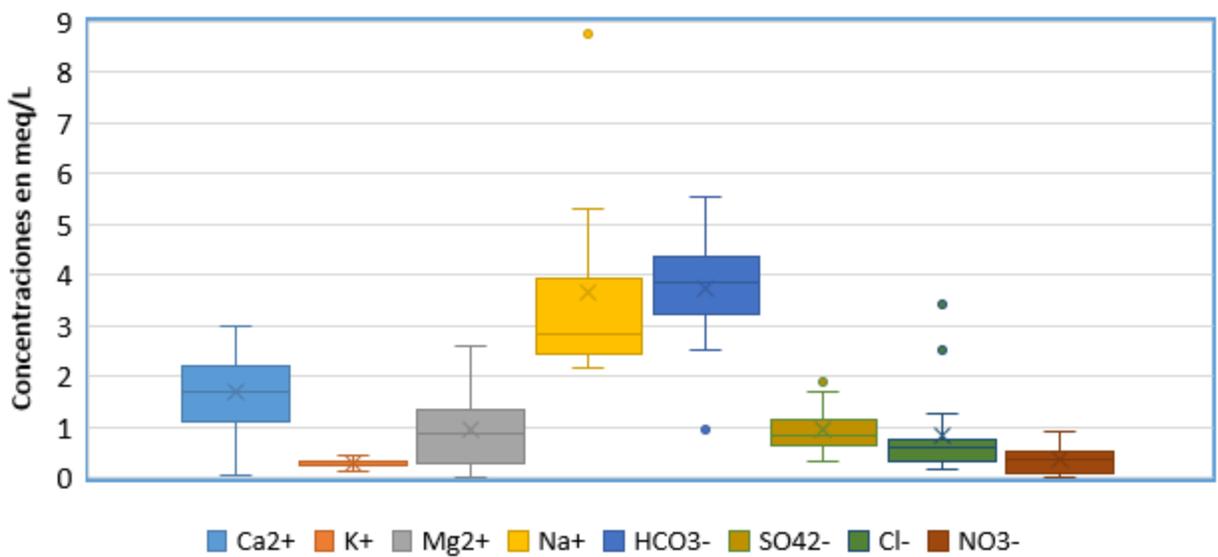


Figura 56. Diagramas de cajas y bigotes de los elementos mayoritarios de las 21 muestras de agua subterránea (Fuente: elaboración propia).

5.4.3 Elementos minoritarios

En la Figura 57, se presentan los diagramas para los elementos minoritarios en miliequivalentes/litro. En el cual, se observa el boro como el elemento más abundante. Así mismo, se presentan muestras atípicas de boro, flúor y litio que son elementos propios a un ambiente geotermal.

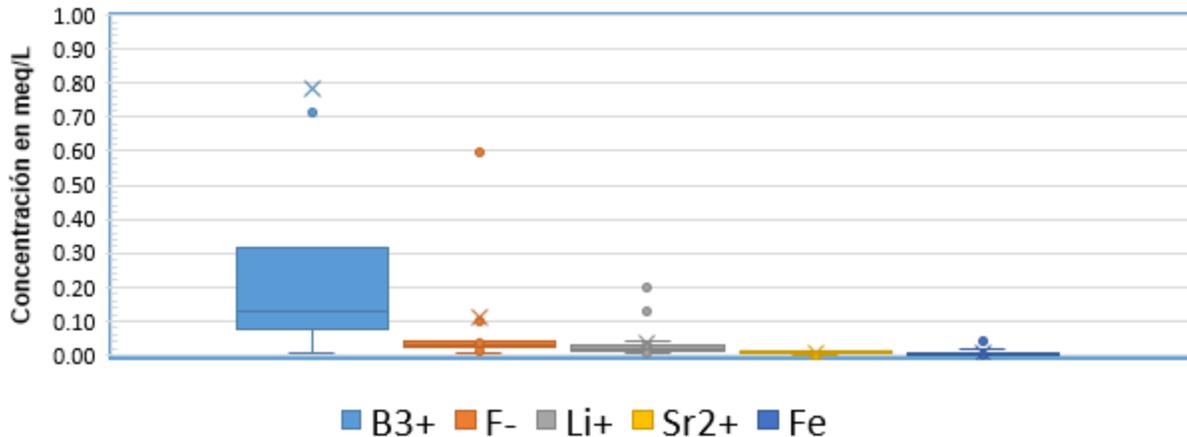


Figura 57. Diagramas de cajas y bigotes para los elementos minoritarios de las 21 muestras de agua subterránea (Fuente: elaboración propia).

5.4.4 Elementos traza

En la Figura 58, se muestran los blox-plot para los elementos traza en miliequivalentes/litro, y se puede observar la notable presencia de zinc como elemento más abundante seguido por cadmio y aluminio.

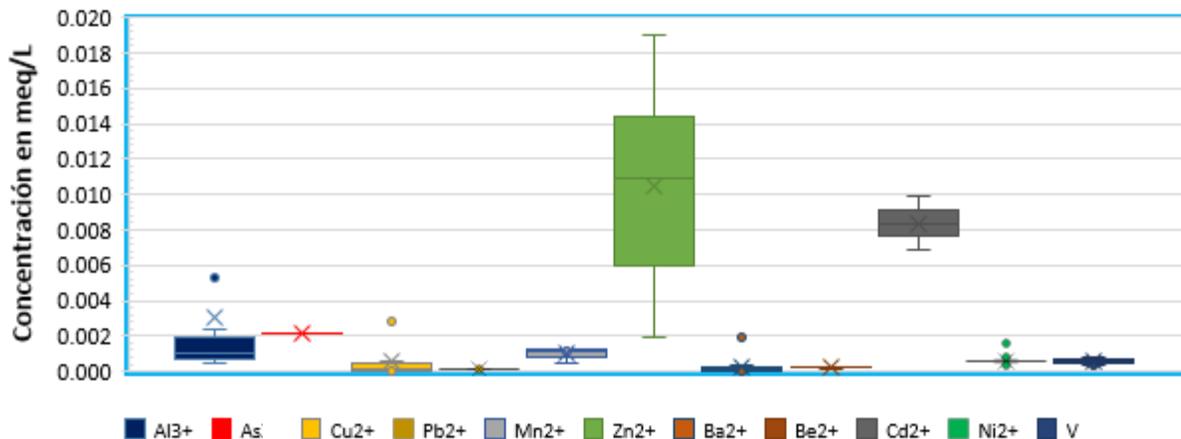


Figura 58. Diagramas de cajas y bigotes de los elementos traza de las 21 muestras de agua subterránea (Fuente: elaboración propia).

5.5 Índice de la calidad del agua

Se determinó la calidad del agua subterránea de los 19 pozos y el manantial termal, para ello se utilizó el índice de calidad del agua (Ver Capítulo 3.5.3), comparándose con los criterios de la norma NOM-127-SSA1-1994 para uso y consumo humano. Se consideraron 17 parámetros. En la Tabla 24, se muestra la clasificación del índice de la calidad del agua y en la Tabla 25, se muestran los resultados de los índices de calidad del agua subterránea.

El 62% de las muestras de agua tiene un rango del 80-94 lo que significa que están en una buena condición a pesar de que presentan algunas amenazas o daños de poca magnitud; el 19% de los pozos muestreados presentan una condición regular lo que indica que el agua es ocasionalmente amenazada, contaminada o dañada; y un 19% de los pozos muestreados (entre ellos el manantial termal) se encuentran frecuentemente contaminados, amenazados o dañados. Existen diversos factores que pudieran afectar la calidad del agua, entre los factores que pudieran influir son las descargas de aguas residuales y la fuente del manantial termal Salitre.

Tabla 24. Clasificación de la Calidad del Agua.

Rango	Condición del agua	Descripción
95-100	Excelente	No contaminada.
80-94	Buena	Agua de buena calidad.
65-79	Regular	Agua con indicio de contaminación.
45-64	Contaminada	Agua contaminada.
0-44	Muy contaminada	Agua muy contaminada.

Fuente: Con base a datos de Canadian Council of Ministers of the Environment, 2001.

Tabla 25. Resultados de los índices de calidad de los pozos de agua muestreados.

Pozo	Alcance (F ₁)	Frecuencia (F ₂)	Amplitud (F ₃)	Número total de variables	Número real de variables probadas	Número de pruebas	Número de pruebas fallidas	Número de pruebas aprobadas	CCM E WQI
S. Miguel Ixtla	23.1	23.1	27.3	17	13	13	3	10	75.4
Castillo 150	20.0	20.0	83.8	17	15	15	3	12	48.9
Castillo 200	20.0	20.0	88.3	17	15	15	3	12	46.5
Granja Quanni	21.4	21.4	4.2	17	14	14	3	11	82.3
La Estancia	25.0	25.0	10.7	17	12	12	3	9	78.7
Fuentes Balvanera	23.1	23.1	3.5	17	13	13	3	10	81.0
Calera Obrajuelo	16.7	16.7	12.6	17	12	12	2	10	84.6
Punta de Obrajuelo	21.4	21.4	12.5	17	14	14	3	11	81.1
La Norita	35.7	35.7	38.9	17	14	14	5	9	63.2
Don Manuel	14.3	14.3	13.5	17	14	14	2	12	86.0
Mtal termal Salitre	45.5	45.5	60.5	17	11	11	5	6	49.0
Santa Fe	21.4	21.4	10.6	17	14	14	3	11	81.5
Poniente 4	14.3	14.3	9.2	17	14	14	2	12	87.2
San Pedro Mártir 1	14.3	14.3	10.0	17	14	14	2	12	87.0
Ejido Romeral	15.4	15.4	16.1	17	13	13	2	11	84.4
Pueblito 2 Garza	16.7	16.7	27.2	17	12	12	2	10	79.2
S. José de los Olvera 2	16.7	16.7	14.0	17	12	12	2	10	84.2
Los Olvera 2	15.4	15.4	22.1	17	13	13	2	11	82.1
S. Fco Corregidora	7.7	7.7	1.7	17	13	13	1	12	93.6
Poniente 1	23.1	23.1	6.3	17	13	13	3	10	80.8
Zapata	23.1	23.1	17.7	17	13	13	3	10	78.6

La Figura 59, muestra el mapa de la distribución espacial de la calidad del agua de los pozos, donde evidentemente la muestra del agua del manantial termal Salitre se encuentra en una condición contaminada debido al origen geotermal, sin embargo, el pozo la Norita, Balvanera y el Castillo se encuentran influenciados por flujos regionales provenientes del manantial termal presentando correlaciones en aluminio, cobre, plomo, manganeso y cadmio.

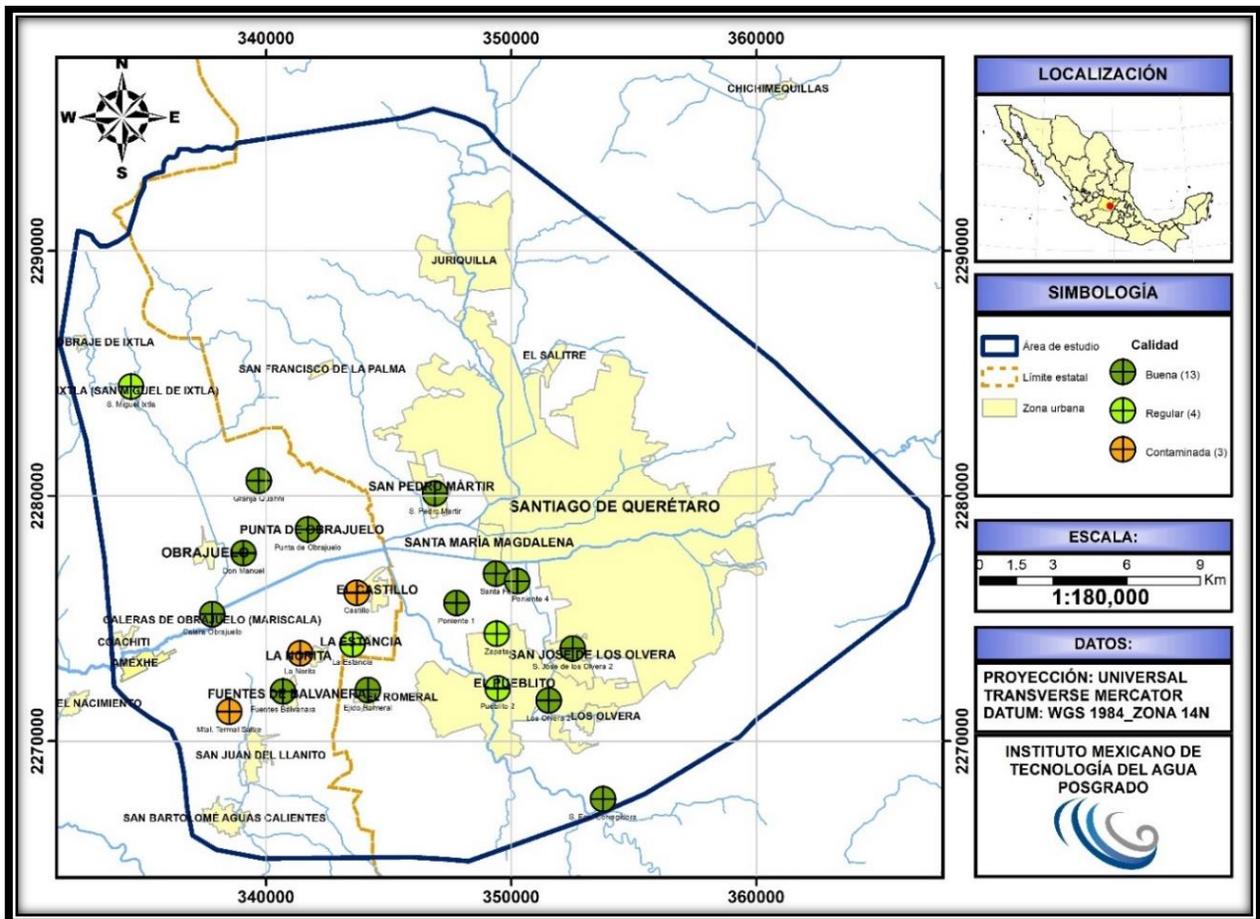


Figura 59. Mapa de la distribución de la calidad del agua subterránea de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales INEGI, 2010 a y b;).

En la Tabla 26, se muestran los resultados de los 17 parámetros analizados y comparados con la norma NOM-127-SSA1-1994 y la OMS. De acuerdo al análisis hidrogeoquímico del agua subterránea se tiene evidencias de contaminación de origen antropogénico y la modificación química de fuentes naturales de origen geotermal debido a la zona de estudio.

Tabla 26. Evaluación de la calidad del agua subterránea con respecto a los criterios de la NOM-127-SSA1-1994 y la OMS.

No	POZO	Uso	pH	SDT	Dureza	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Fe	B ³⁺	F ⁻	Al ³⁺	As	Cu ²⁺	Pb ²⁺	Mn ²⁺	Zn ²⁺	Ba ²⁺	Cd ²⁺
				mg/l	mg/l	mg/L	mg/L	mg/L	mg/l	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	San Miguel Ixtla	Agua Potable	7.4	236.9	280.7	49.51	18.6	11.68	56.4	<l.c.	0.027	0.161	0.007	<l.c.	0.002	0.011	<l.c.	0.513	0.011	<l.c.
2	Castillo 150m	Riego	-	170	83.82	87.53	27.8	8.12	4.18	0.479	1.024	0.437	0.047	<l.c.	0.090	0.018	0.0131	0.154	0.019	0.387
	Castillo 200m	Riego	-	146.8	51.27	80.56	26.2	10.67	0.28	1.102	1.142	0.693	0.018	<l.c.	0.089	0.016	0.0325	0.206	0.016	0.553
3	Granja Quanni	Agua Potable	7.9	177	38.97	89.23	42.1	11.33	11.5	0.013	1.116	0.835	0.021	<l.c.	0.003	0.013	<l.c.	0.064	0.004	<l.c.
4	La Estancia	Agua Potable	7.7	181.8	127.3	53.3	32.7	15.58	22.4	<l.c.	0.356	0.516	0.005	<l.c.	<l.c.	0.010	<l.c.	0.277	0.005	<l.c.
5	Fuentes Balvanara	Agua Potable	7.5	451.8	223.3	121.7	93.9	121.2	9.74	0.006	11.370	1.848	0.007	<l.c.	<l.c.	0.011	<l.c.	0.236	0.010	<l.c.
6	Calera Obrajuelo	Agua Potable	7.4	295	158.9	89.96	82	45.05	25.8	<l.c.	2.579	0.748	0.005	<l.c.	<l.c.	0.009	<l.c.	0.547	0.006	<l.c.
7	Punta de Obrajuelo	Agua Potable	7.5	166.3	123.8	57.61	35.4	11.13	27.9	0.002	0.553	0.424	0.008	<l.c.	0.020	0.011	<l.c.	0.187	0.010	<l.c.
8	La Norita	Agua Potable	7.0	413.5	49.01	201.4	53.5	92.98	0.5	0.637	17.840	11.360	0.019	0.0538	<l.c.	<l.c.	0.0358	0.123	0.129	<l.c.
9	Don Manuel	Agua Potable	7.7	220.2	163.7	64.67	55.3	22.63	30	0.010	0.471	0.312	0.015	<l.c.	0.002	0.010	<l.c.	0.101	0.020	<l.c.
10	Manantial termal Salitre	Manantial	9	-	-	200.4	40.6	89.68	0.29	0.012	19.480	23.090	0.342	<l.c.	<l.c.	0.023	<l.c.	0.295	0.002	<l.c.
11	Santa Fe	Agua Potable	7.5	223.6	185.3	73.47	40.2	27.32	23.4	0.004	0.360	0.774	0.010	<l.c.	0.002	0.012	<l.c.	0.621	0.019	<l.c.
12	Poniente 4	Agua Potable	7.6	203.2	168.4	64.52	37.5	24.31	22.6	0.009	0.315	0.587	0.015	<l.c.	0.002	0.010	<l.c.	0.506	0.005	<l.c.
13	San Pedro Mártir 1-BIS	Agua Potable	7.5	165.1	126.4	57.36	35.7	9.96	24	0.006	0.303	0.430	0.017	<l.c.	0.003	0.008	<l.c.	0.388	0.018	<l.c.
14	Ejido Romeral	Agua Potable	7.8	283.7	192.2	78.45	90.5	25.47	32.9	0.003	0.776	0.648	0.009	<l.c.	<l.c.	0.010	<l.c.	0.357	0.010	<l.c.
15	Pueblito 2 Garza	Agua Potable	7.7	210	219.7	50.68	32.6	22.42	52.9	<l.c.	0.184	0.221	0.007	<l.c.	<l.c.	0.009	<l.c.	0.411	0.010	<l.c.
16	San José de los Olvera 2	Agua Potable	7.7	178.3	118.5	52.76	49.1	16.03	27.6	<l.c.	0.240	0.573	0.005	<l.c.	<l.c.	0.010	<l.c.	0.329	0.003	<l.c.
17	Los Olvera 2	Agua Potable	7.8	232.4	58.92	112.2	59.9	21.83	44.9	0.002	0.760	0.481	0.007	<l.c.	<l.c.	0.009	<l.c.	0.405	0.001	<l.c.
18	San Francisco Corregidora	Agua Potable	8.0	133.5	118.6	54.76	15.7	5.63	3.51	<l.c.	0.093	0.256	0.009	<l.c.	0.003	0.010	<l.c.	0.432	0.022	<l.c.
19	Poniente 1	Agua Potable	7.7	170.1	146.1	59.05	29.4	13.13	16.2	<l.c.	0.285	0.536	0.004	<l.c.	0.002	0.011	<l.c.	0.584	0.010	<l.c.
20	Zapata	Agua Potable	7.8	211.3	167	56.84	50.6	22.88	35.9	<l.c.	0.281	0.548	0.005	<l.c.	0.002	0.010	<l.c.	0.437	0.008	<l.c.
NOM-127-SSA1-1994		Limite permisible	6.5 - 8.5	1000	500	200	400	250	10	0.3		1.5	0.2	0.025	2	0.01	0.15	5	0.7	0.005
OMS-2017		Limite permisible	6.5 - 8.5	1000	100	200	250	250	50	0.3	2.4	1.5	0.2	0.01	2	0.01	0.4	3	0.7	0.003

■ Valor por arriba del límite permisible de la NOM-127-SSA1-1994.

<l.c. Límite de cuantificación.

5.6 Análisis estadístico bivariado

5.6.1 Coeficiente de correlación

Tabla 27. Matriz de correlación entre las variables

	T	pH	Eh	C.E.	OD	SD	Dureza	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Si ⁴⁺	Sr ²⁺	Fe	B ³⁺	F ⁻	Al ³⁺	As	Cu ²⁺	Pb ²⁺	Mn ²⁺	Zn ²⁺	Ba ²⁺	Li ⁺	Be ²⁺	Cd ²⁺	Ni ²⁺	V	S			
T	1.00																																			
pH	0.66	1.00																																		
Eh	-0.44	0.14	1.00																																	
C.E.	0.57	0.34	-0.37	1.00																																
OD	-0.02	0.63	0.60	-0.15	1.00																															
SD	-0.23	0.08	0.14	0.97	0.11	1.00																														
Dureza	-0.31	0.24	0.50	0.10	0.55	0.42	1.00																													
Ca ²⁺	-0.40	0.18	0.60	-0.02	0.57	0.36	0.98	1.00																												
K ⁺	0.21	0.40	0.06	0.59	0.24	0.47	0.35	0.32	1.00																											
Mg ²⁺	-0.17	0.31	0.36	0.25	0.49	0.45	0.97	0.90	0.37	1.00																										
Na ⁺	0.62	0.04	-0.67	0.75	-0.56	0.19	-0.56	-0.65	0.20	-0.42	1.00																									
HCO ₃ ⁻	0.08	-0.05	-0.24	0.41	-0.30	0.15	0.35	0.30	0.45	0.41	0.17	1.00																								
SO ₄ ²⁻	0.16	0.26	0.18	0.56	0.19	0.65	0.16	0.11	0.42	0.22	0.31	-0.25	1.00																							
Cl ⁻	0.54	0.23	-0.45	0.93	-0.27	0.51	-0.08	-0.19	0.58	0.07	0.79	0.28	0.57	1.00																						
NO ₃ ⁻	-0.09	0.37	0.48	-0.11	0.67	0.11	0.65	0.66	-0.13	0.59	-0.51	-0.16	0.07	-0.35	1.00																					
Si ⁴⁺	0.75	0.19	-0.49	0.30	-0.30	-0.57	-0.33	-0.38	0.00	-0.24	0.46	0.13	-0.07	0.34	-0.23	1.00																				
Sr ²⁺	-0.21	0.22	0.34	0.32	0.50	0.56	0.87	0.81	0.47	0.89	-0.32	0.39	0.30	0.20	0.43	-0.31	1.00																			
Fe	-0.40	-0.82	-0.37	-0.07	-0.72	0.06	-0.43	-0.41	-0.22	-0.44	0.30	0.12	-0.19	0.05	-0.51	-0.21	-0.34	1.00																		
B ³⁺	0.68	0.14	-0.70	0.83	-0.49	0.20	-0.40	-0.51	0.41	-0.25	0.94	0.34	0.28	0.89	-0.51	0.51	-0.13	0.21	1.00																	
F ⁻	0.83	0.19	-0.71	0.62	-0.49	-0.23	-0.52	-0.60	0.21	-0.39	0.85	0.29	0.03	0.64	-0.44	0.77	-0.37	0.12	0.89	1.00																
Al ³⁺	0.78	0.11	-0.61	0.37	-0.43	-0.53	-0.49	-0.55	0.00	-0.38	0.63	0.17	-0.08	0.42	-0.37	0.95	-0.39	-0.01	0.66	0.90	1.00															
As	0.14	-0.98	-0.39	0.51	-0.34	0.49	-0.28	-0.31	0.35	-0.23	0.62	0.35	0.09	0.46	-0.30	-0.25	-0.13	0.43	0.59	0.39	-0.03	1.00														
Cu ²⁺	-0.58	-0.98	-0.19	-0.39	-0.61	-0.22	-0.32	-0.25	-0.44	-0.37	-0.04	0.02	-0.32	-0.26	-0.40	-0.06	-0.28	0.78	-0.13	-0.13	0.00	-0.09	1.00													
Pb ²⁺	0.22	-0.33	-0.36	-0.15	-0.43	-0.67	-0.30	-0.31	-0.38	-0.25	0.11	-0.01	-0.24	-0.04	-0.28	0.76	-0.33	0.09	0.10	0.35	0.69	-0.58	0.46	1.00												
Mn ²⁺	-0.27	-0.65	-0.42	0.13	-0.68	0.23	-0.44	-0.43	-0.05	-0.42	0.45	0.22	-0.12	0.20	-0.51	-0.27	-0.31	0.95	0.38	0.23	-0.02	0.70	0.58	-0.14	1.00											
Zn ²⁺	0.01	0.31	0.58	-0.03	0.27	-0.06	0.50	0.51	0.08	0.46	-0.34	0.13	-0.08	-0.18	0.41	0.01	0.21	-0.41	-0.32	-0.20	-0.13	-0.30	-0.36	-0.08	-0.43	1.00										
Ba ²⁺	0.02	-0.10	-0.33	0.44	-0.33	0.48	-0.22	-0.24	0.37	-0.19	0.53	0.43	0.01	0.38	-0.35	-0.32	-0.04	0.48	0.52	0.31	-0.09	0.97	0.01	-0.57	0.73	-0.31	1.00									
Li ⁺	0.73	0.07	-0.71	0.65	-0.59	-0.12	-0.54	-0.61	0.24	-0.42	0.90	0.33	0.08	0.70	-0.53	0.70	-0.37	0.24	0.92	0.98	0.84	0.48	-0.02	0.32	0.36	-0.26	0.41	1.00								
Be ²⁺	0.75	0.16	-0.71	0.64	-0.50	-0.10	-0.53	-0.60	0.26	-0.41	0.88	0.34	0.02	0.64	-0.44	0.60	-0.37	0.21	0.91	0.97	0.77	0.61	-0.13	0.15	0.38	-0.25	0.53	0.97	1.00							
Cd ²⁺	-0.56	-0.97	-0.20	-0.36	-0.65	-0.20	-0.32	-0.27	-0.44	-0.37	0.00	-0.01	-0.28	-0.21	-0.41	-0.08	-0.30	0.85	-0.10	-0.10	0.01	-0.07	0.97	0.45	0.64	-0.31	0.01	0.00	-0.10	1.00						
Ni ²⁺	0.63	0.00	-0.50	0.18	-0.41	-0.65	-0.37	-0.41	-0.11	-0.29	0.40	0.14	-0.17	0.25	-0.30	0.98	-0.36	-0.06	0.45	0.73	0.94	-0.29	0.12	0.85	-0.16	-0.03	-0.35	0.66	0.55	0.11	1.00					
V	-0.21	0.38	0.51	-0.21	0.72	0.24	0.50	0.47	0.01	0.49	-0.56	-0.33	0.30	-0.26	0.46	-0.34	0.51	-0.68	-0.53	-0.64	-0.51	-0.48	-0.37	-0.25	-0.71	0.13	-0.46	-0.70	-0.69	-0.46	-0.42	1.00				
S	0.85	0.24	-0.55	0.46	-0.32	-0.44	-0.42	-0.49	0.09	-0.30	0.65	0.11	0.08	0.49	-0.29	0.94	-0.33	-0.10	0.69	0.90	0.98	-0.04	-0.13	0.62	-0.10	-0.07	-0.12	0.83	0.77	-0.11	0.90	-0.44	1.00			

 Buena correlación positiva

 Buena correlación negativa

1.0 Correlación r=1

Se realizó una matriz de coeficientes de correlación para los 33 parámetros analizados en el agua subterránea del área de estudio. Se consideró una correlación positiva a los coeficientes mayores a 7 ($r > 0.7$) resaltados en color rojo y para las correlaciones negativas se establecieron los coeficientes superiores a -0.7 y son resaltados en color azul, estos valores representan una buena correlación entre las variables (Tabla 27).

De acuerdo a los resultados de los coeficientes de correlaciones, se realizaron las siguientes graficas que ayudan a complementar el estudio de la evolución y composición del agua subterránea, como es el caso de la relación de la temperatura/conductividad eléctrica (T/CE) y la relación de la conductividad eléctrica/sólidos disueltos totales (CE/SDT), que a continuación se describen.

La relación de temperatura/conductividad eléctrica (T/CE) proporciona información relacionada a proceso de mezcla de agua. En la Figura 60, se distinguen tres grupos de aguas; en el grupo A se concentra el 85% de las muestras, en el grupo B presenta el 10% de muestras y se ubica el pozo Fuentes Balvanera (FB) y La Norita (LN) y por último el grupo C representa el 5% que represente el manantial termal Salitre (MTS).

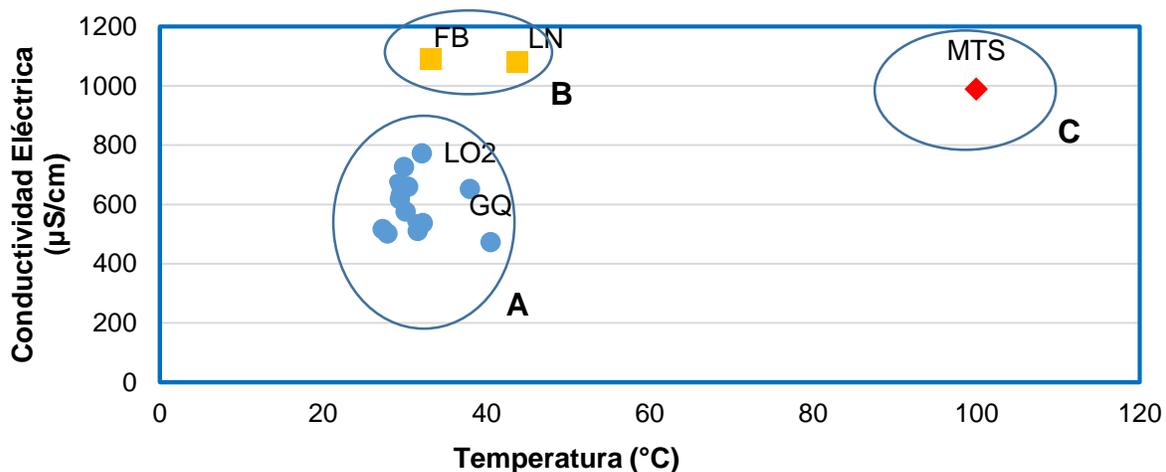


Figura 60. Diagrama de la relación de temperatura/conductividad eléctrica (T/CE).

Las correlaciones mayores a $r > 0.7$ que ayudaron en la interpretación de la evolución y procesos hidrogeoquímicos del agua subterránea son: la relación de la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales (CE/SDT), esto es evidente debido al aumento de las concentraciones iónicas aumenta la conductividad eléctrica (Figura 61).

En la Figura 61, se observa la relación de la CE/SDT que muestra una correlación de 0.97 (Tabla 27). Se observa que a mayor número de sólidos disueltos totales aumenta la conductividad eléctrica. El pozo Fuentes Balvanera (FB) y La Norita (LN) presentan valores muy por arriba de la media, lo que significa una posible mezcla de flujos regionales.

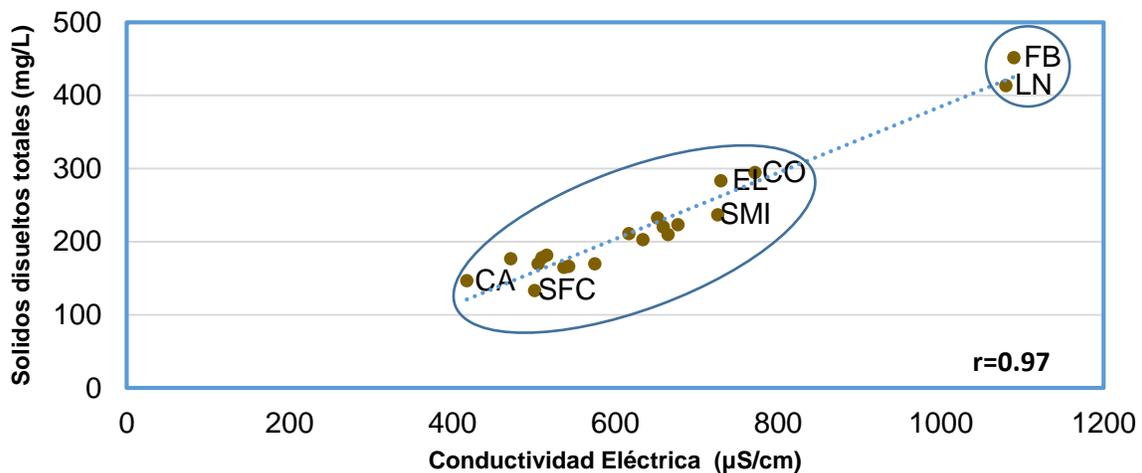


Figura 61. Diagrama de dispersión de la relación CE/SD.

5.6.2 Índices hidrogeoquímicos

En este apartado, se describen los índices hidrogeoquímicos (o relaciones iónicas) de acuerdo a las características hidrogeológicas de la zona de estudio, esto con la finalidad de identificar los diferentes tipos de aguas y observar la evolución en la composición hidrogeoquímica del agua subterránea.

La correlación de calcio y magnesio ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$) presentaron una $r = 0,96$ (Tabla 27 y Figura 62), lo que significa, que presentan un origen común y se interpreta que a partir de la disolución de rocas ricas en Ca^{2+} y Mg^{2+} , se liberan estos componentes en la solución. Por otra parte, los elementos traza (Al^{3+} , As, B, Ba^{2+} , Be^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , F-, Fe, Li^{+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} , Sr^{2+} , Zn^{2+}) presentan correlaciones mayores a 0.7. Las relaciones de estos elementos pueden asociarse a contaminación producida por el hombre o procesos hidrotermales, debido a las evidencias reportadas en el área de estudio.

En la Figura 62, se observa que las muestras del agua subterránea presentan un coeficiente de correlación positiva ($r=0.86$) de Ca/Mg y una relación mayor a 1. El incremento del calcio puede relacionarse a procesos de disolución de rocas carbonatadas. Para el caso del magnesio se debe a la influencia de terrenos ricos en silicatos magnésicos como los gabros y basaltos.

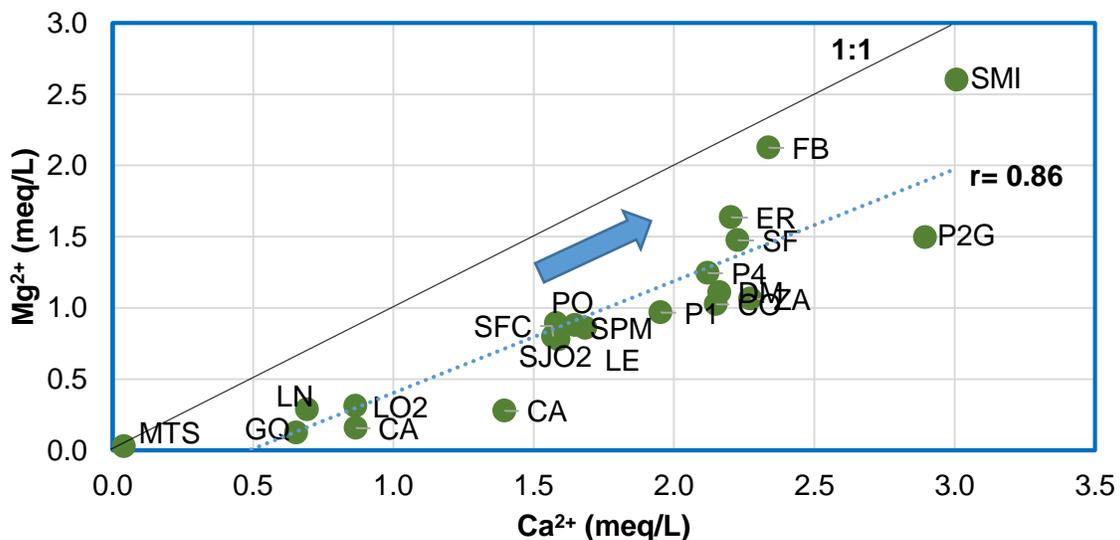


Figura 62. Relación iónica calcio/magnesio ($r\text{Ca}^{+2}/r\text{Mg}^{+2}$) de las muestras del agua.

En la Figura 63, se muestra la relación de sodio/calcio, en el cual el 90% de las muestras están por arriba de la relación a 1 y para la muestra de San Miguel Ixtla (SMI) y Pueblito 2 Garza (P2G) tienen una relación menor a 1, lo que significa que son muestras de flujos locales.

Se observa una correlación negativa o descendente de calcio por lo que indicaría un intercambio iónico de sodio por calcio debido a la presencia de arcillas en el área de estudio. El incremento de sodio, se debe posiblemente a la disolución de feldespatos sódicos y el calcio es retenido por las arcillas. La muestra del manantial termal Salitre (MTS) y el pozo La Norita (LN) presentan un dominio de sodio con respecto al calcio.

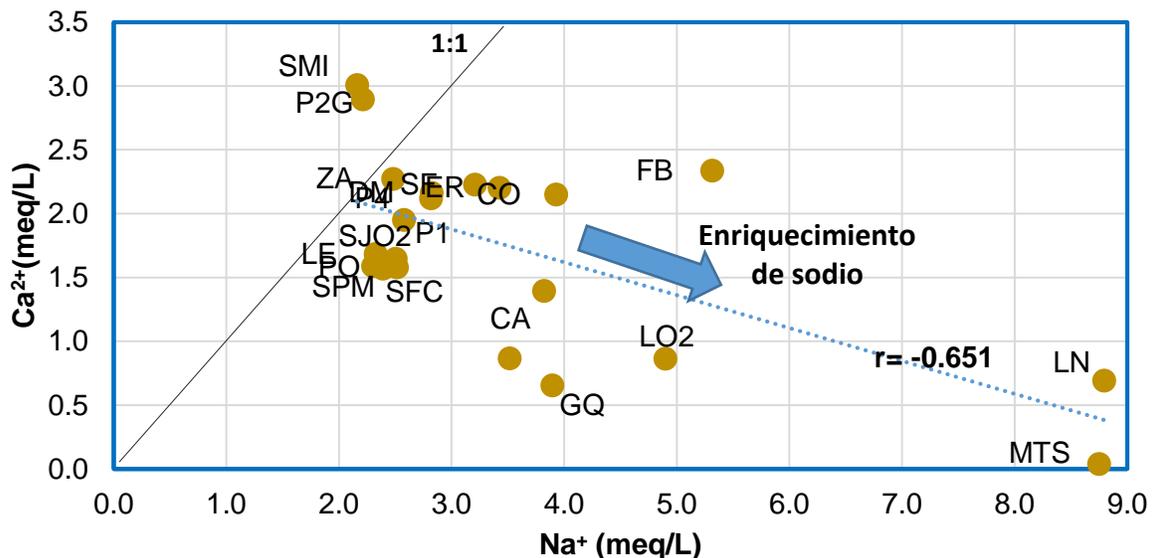


Figura 63. Relación iónica sodio/calcio (rNa^+/rCa^{+2}) de las muestras del agua.

La relación iónica de sodio/calcio + magnesio ($rNa^+/rCa^{+2} + rMg^{+2}$), nos indica las variaciones litológicas bruscas o presencia de fallas y fracturas que dividen el acuífero. En la Figura 64 se observa una distribución dispersa de los datos, sin embargo, se pueden distinguir 5 agrupaciones litológicas que puede demostrar diferentes tipos de aguas y se demuestra la heterogeneidad del acuífero.

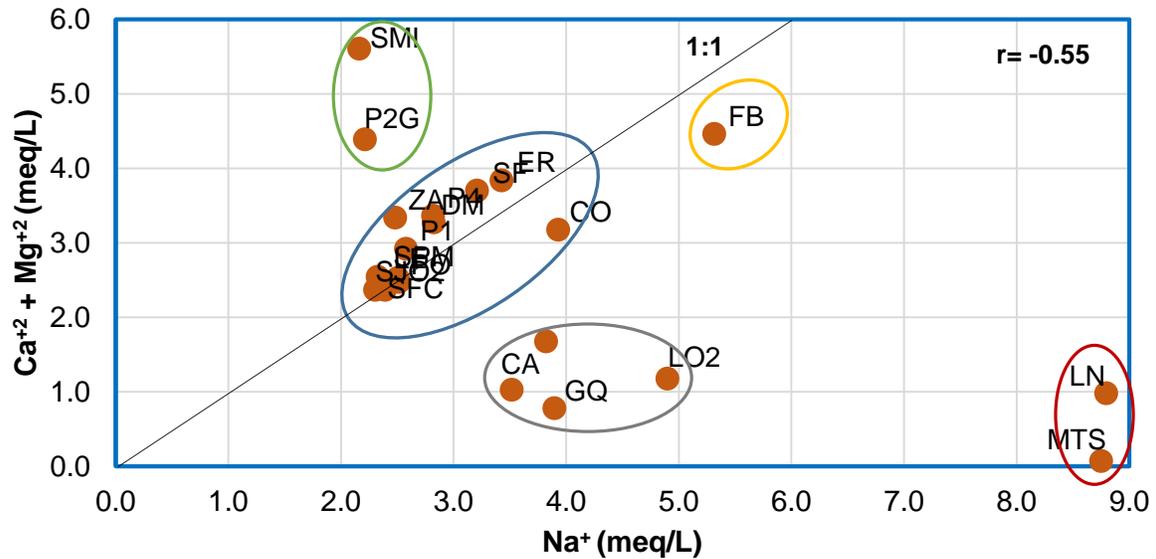


Figura 64. Relación iónica sodio/calcio ($rNa^+/rCa^{2+}+rMg^{2+}$) de las muestras del agua.

En la Figura 65, se representa la relación de sulfato y cloro. Se calcula que el 76 % de las muestras tienen una relación constante y muy cercana a 1. Para los pozos Calera Obrajuelo (CO) y Ejido Romeral (ER), demuestran características de mezcla de aguas ricas en sulfatos por la posible infiltración de fertilizantes, debido a la gran actividad agrícola presente en la zona de estudio. Mientras que para el pozo La Norita (LN) y Fuentes Balvanera (FB) son aguas ricas en cloruros debido a un aporte de un flujo regional que asciende a través de fallas y fracturas de la zona de estudio.

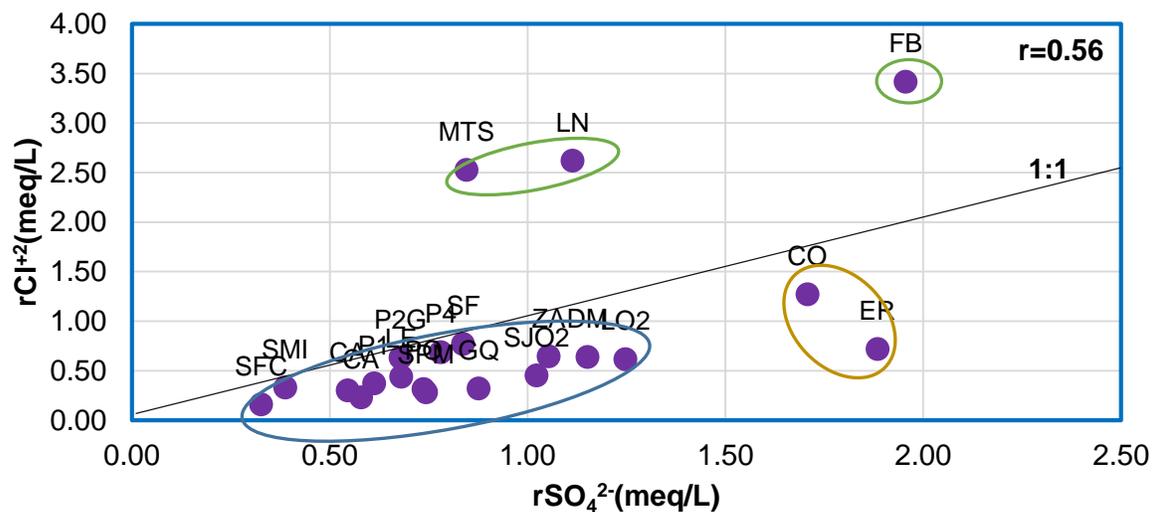


Figura 65. Relación iónica sulfato/cloro (rSO_4^{2-}/rCl^{-}) de las muestras del agua.

En la Figura 66, se presenta la relación del cloro y bicarbonato (Cl/HCO), que de acuerdo a los resultados se puede determinar que mediante este índice hidrogeoquímico la relación iónica va de los 0.04 a 0.82 y se ubica en un rango de $0 < rCl/rHCO < 5$, lo que significa que no existe la evidencia de intrusión salina en el acuífero, lo que con lleva a que las muestras del agua subterránea tienen un origen continental. A pesar de ello se pueden diferenciar 2 tipos de aguas. En el grupo A se aprecia aguas ricas en bicarbonato y para el grupo B se presentan aguas ricas en cloruros y se encuentra el pozo La Norita (LN), Fuentes Balvanera (FB) y el manantial termal Salitre (MTS). Estas muestras están influenciadas por un flujo regional que asciende desde las profundidades a través de fallas y fracturas presentes en el área de estudio.

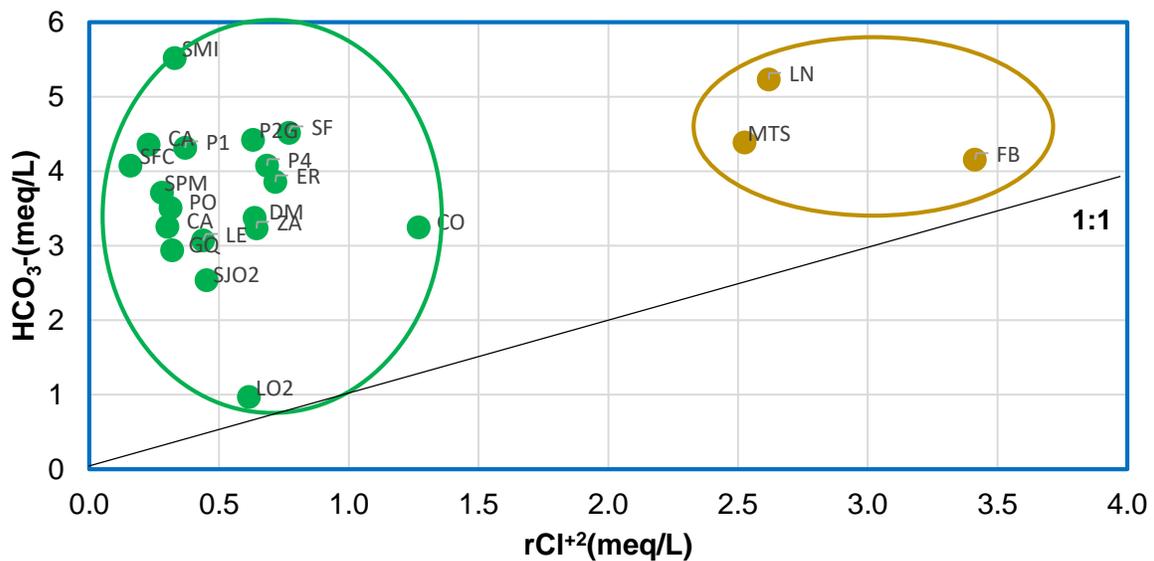


Figura 66. Relación iónica cloro y bicarbonato ($rCl^{+2}/rHCO_4^{2-}$) de las muestras del agua.

En la Figura 67, se puede observar que el 85% de las muestras de agua subterránea presentan una nula relación de sodio y cloro. Sin embargo, el pozo La Norita (LN), Fuentes Balvanera (FB) y el manantial termal Salitre (MTS) presentan aguas ricas en sodio y cloro. Este enriquecimiento se debe a la mezcla de flujos regionales provenientes del manantial termal ubicado por una falla regional de rumbo norte–sur y favorece el ascenso de flujos profundos.

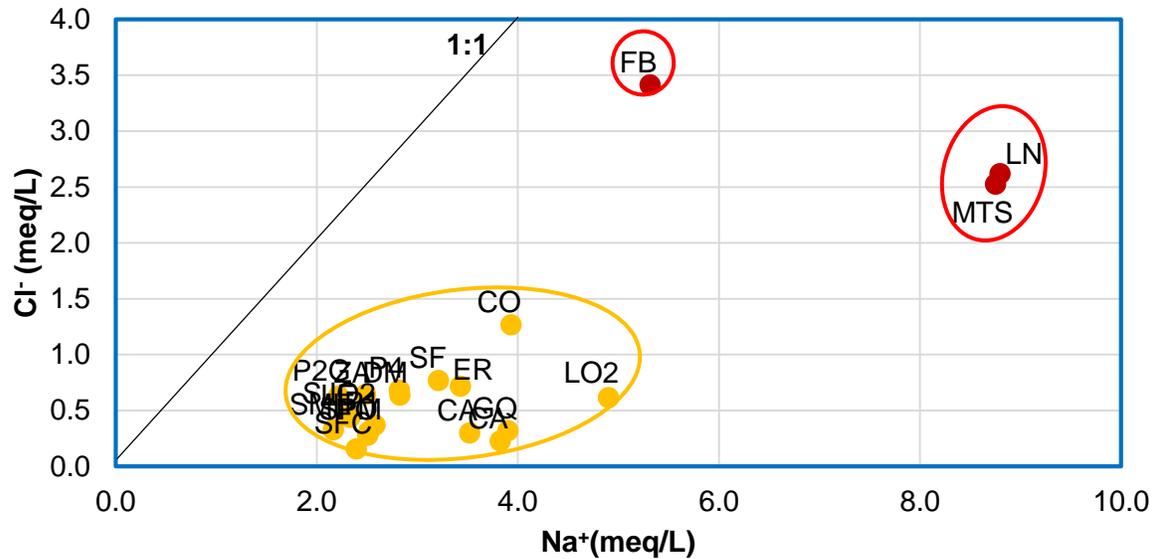


Figura 67. Relación iónica cloro y sodio (r_{Cl^-}/r_{Na^+}) de las muestras del agua.

En la Figura 68, se presenta la relación de la conductividad eléctrica y nitratos. Se puede observar una elevada contaminación por la presencia de nitratos, ya que la norma NOM-127-SSA1-1994 que establece un límite máximo permisible de 10 mg/L. El 76% de las muestras están por encima de la norma, esto debido a la posible actividad agrícola e infiltración de aguas residuales en el área de estudio.

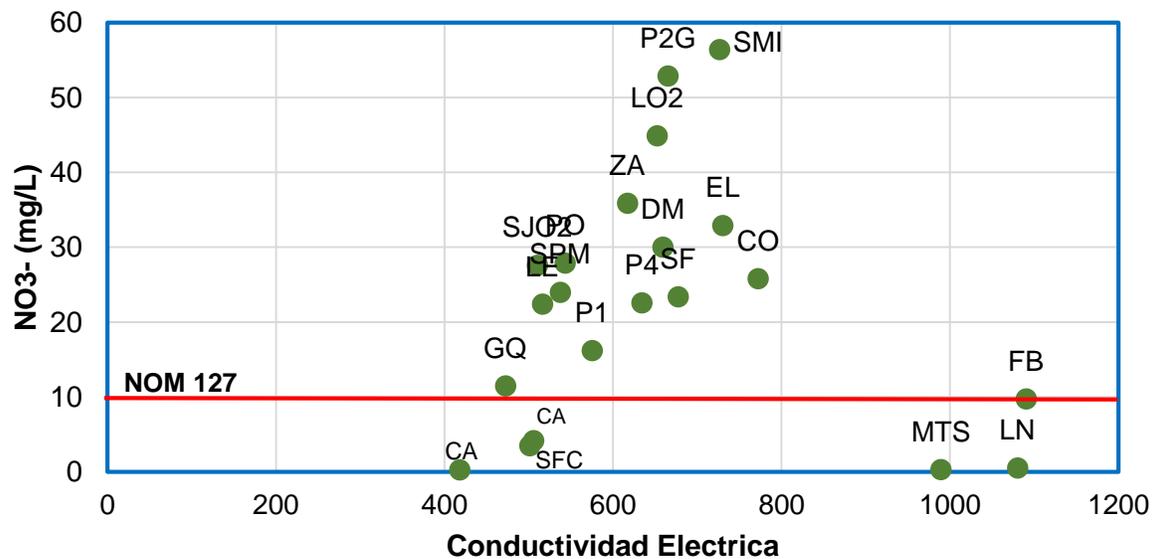


Figura 68. Relación iónica de la conductividad eléctrica y nitratos ($r_{CE}/r_{NO_3^-}$) de las muestras del agua.

El índice de litio/boro permite determinar posibles fuentes hidrotermales. En la Figura 69, se observa como punto de referencia el manantial termal Salitre (MTS), que se encuentra modificando a la composición química del agua subterránea de los pozos La Norita (LN) y Fuentes Balvanera (FB). Las concentraciones de boro van desde 0.01 meq/L a 5.41 meq/L, asociados a fuentes geotermales presentes en la zona suroeste del área de estudio, estos flujos regionales están modificando las características químicas de los pozos LN y FB.

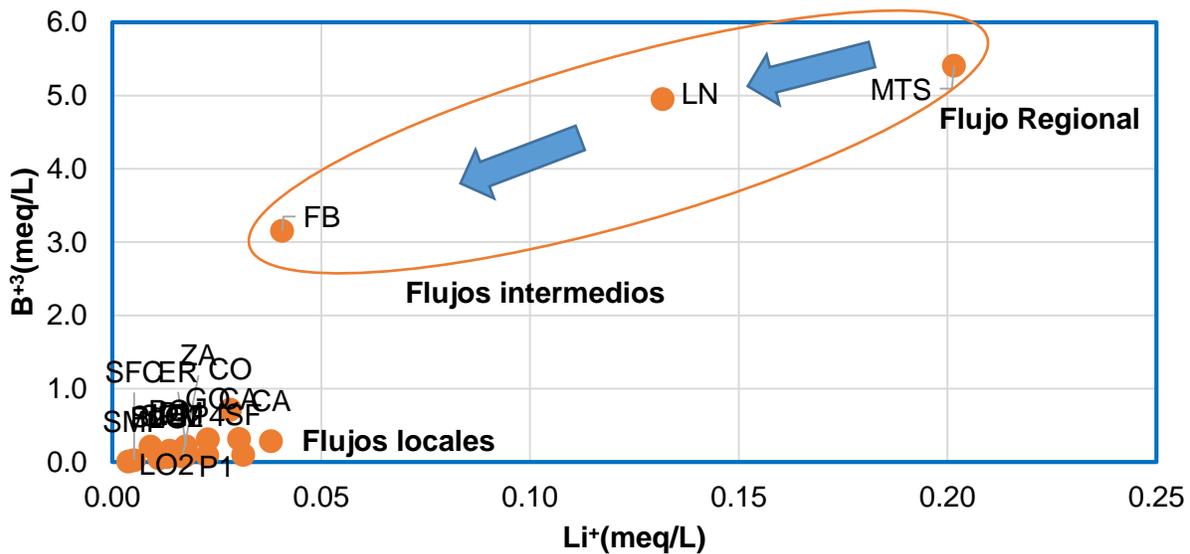


Figura 69. Relación iónica litio y boro (rLi^+/rB^{+3}) de las muestras del agua.

La Figura 70, se presenta la relación entre las concentraciones de litio y flúor. En general, el 85% de las muestras presentan valores de flúor que van de los 0.16 mg/L a los 0.84 mg/L, es decir, concentraciones por debajo de la norma NOM-127-SSA1-1994 que establece un límite máximo permisible de 1.5 mg/L. Sin embargo, la muestra del manantial termal Salitre y el pozo La Norita, muestran una concentración de 23.09 mg/L y 11.63 mg/L respectivamente. Las altas concentraciones de flúor provienen directamente de un flujo regional de origen hidrotermal.

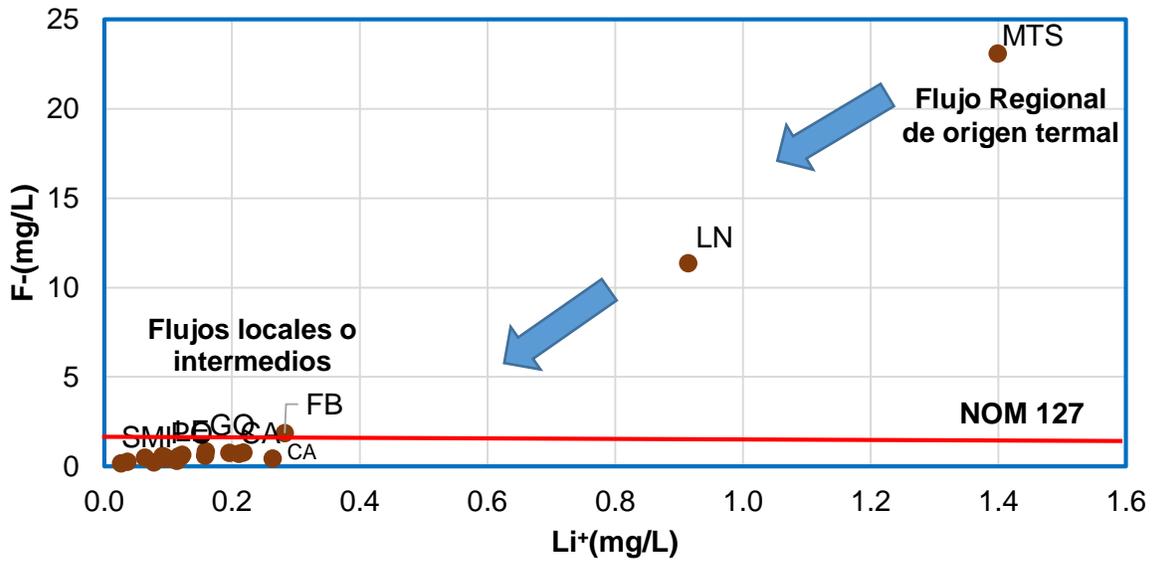


Figura 70. Relación iónica litio y flúor (rLi^+/rF^-) de las muestras del agua.

5.7 Análisis de los parámetros fisicoquímicos e hidrogeoquímicos.

En este apartado, se describen los resultados de los parámetros fisicoquímicos de temperatura, pH, conductividad eléctrica, Eh, sólidos disueltos totales y oxígeno disuelto de las 21 muestras de agua tomadas *in situ*, de las cuales 19 corresponden a pozos y un manantial termal. En la Tabla 18, se muestran los resultados de los parámetros fisicoquímicos y en la Figura 46, se ubican geográficamente los datos.

5.7.1 Temperatura

Debido a la presencia de fuentes hidrotermales y por el gradiente geotérmico, la temperatura del agua subterránea es muy variable, tanto espacial como temporal. En el área de estudio se reportaron temperaturas que van de los 27.3°C a los 43.7°C y se clasifican como aguas moderadamente tibias a calientes a excepción de la muestra del manantial termal Salitre (MTS) que se reportó la mayor temperatura por arriba de los 47 °C y que se clasifican como aguas muy calientes (Figura 71).

La temperatura del manantial termal Salitre está asociada por la ascensión de flujos regionales. Se propone que la temperatura del pozo la Norita (LN), los Olvera 2 (LO2) y la Granja Quanni (GQ) estén relacionados por los flujos regionales y por el alineamiento de sistemas de fallas y fracturas. En el mapa de la Figura 72, se muestra la distribución espacial de la temperatura de los 19 pozos de agua y el manantial termal.

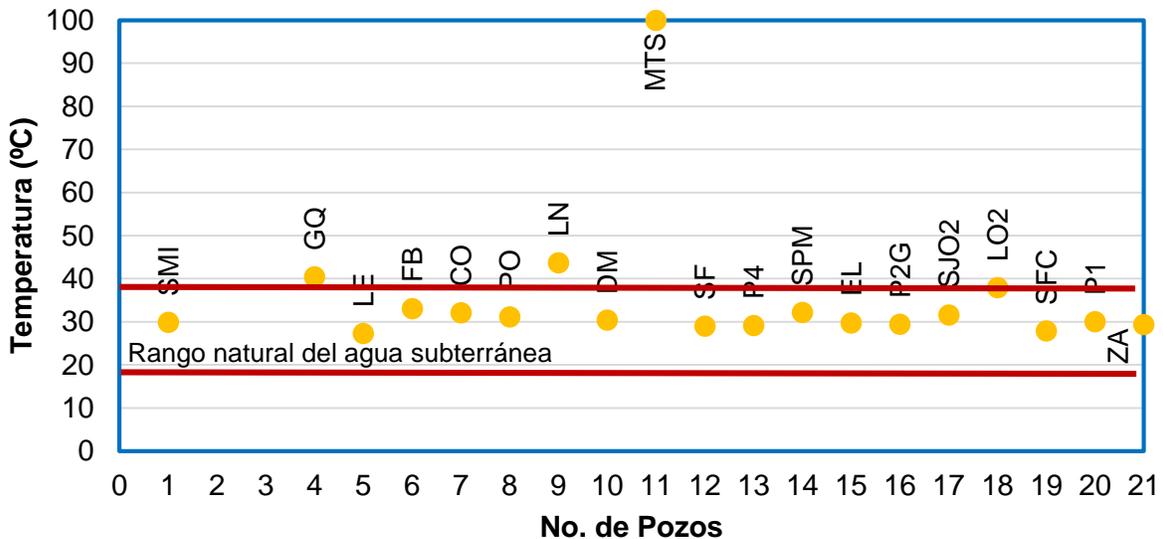


Figura 71. Gráfica de los datos de temperatura.
(Fuente: Elaboración propia).

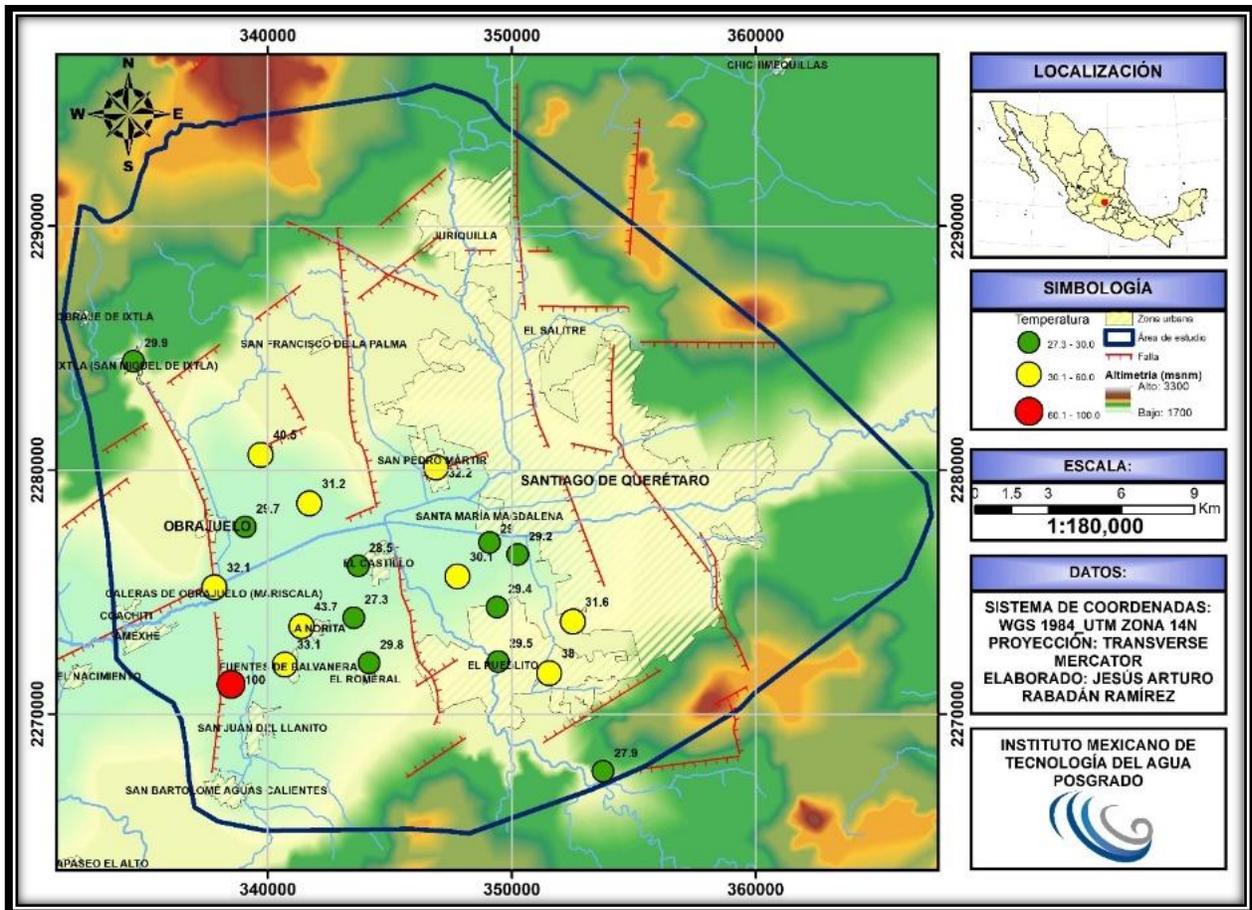


Figura 72. Mapa de la variación espacial de los datos de temperatura obtenidos de los pozos muestreados (Fuente: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.7.2 Potencial de Hidrogeno (pH)

Los valores de pH medidos en campo están en un rango de 7 a los 9.06 y con un valor medio de 7.7 lo cual, indica un agua alcalina que va de lo neutro a lo básico como se muestra en la Figura 73.

Por otra parte, el manantial termal Salitre reportó un pH de 9 lo que representa un alto contenido de bicarbonato sódico, típicos de fuentes geotermales. La distribución espacial del pH se muestra en la Figura 74.

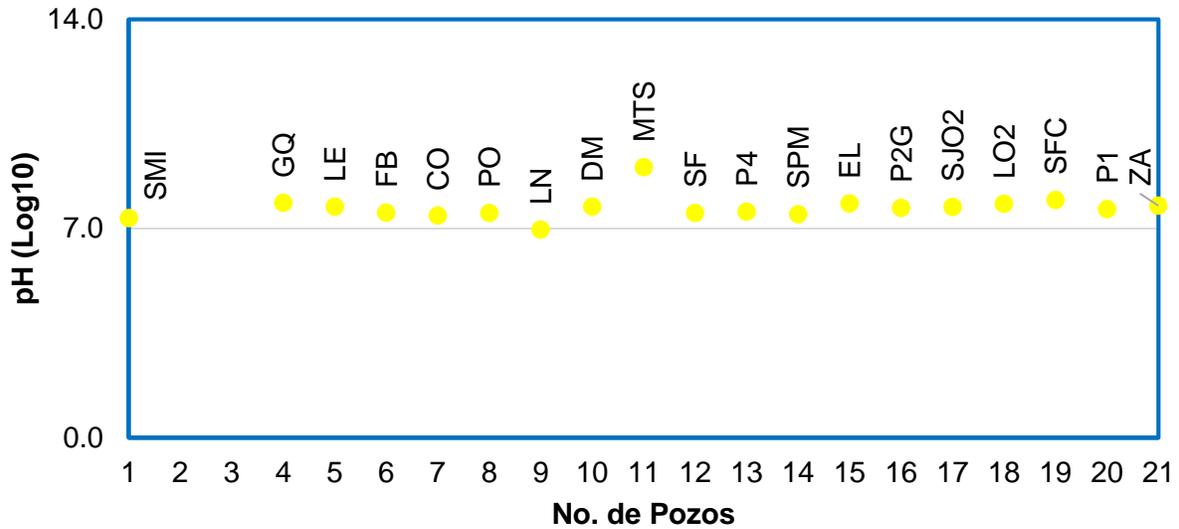


Figura 73. Gráfica de los valores de pH de los pozos muestreados.
(Fuente: Elaboración propia).

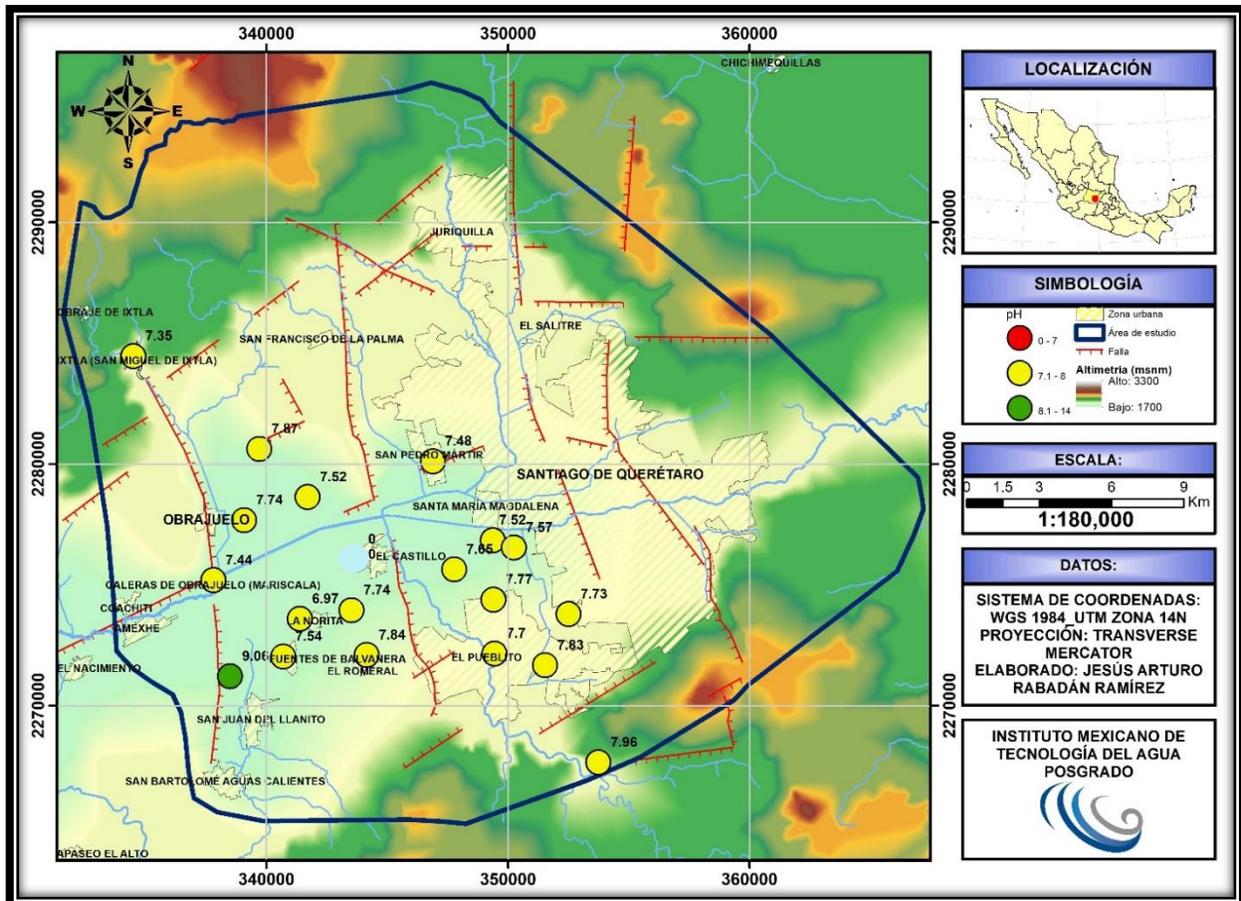


Figura 74. Mapa de la distribución espacial de los datos de pH.
(Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.7.3 Potencial de óxido reducción (Eh)

De los 19 pozos monitoreados, solo se obtuvo información de 14 pozos y del manantial termal Salitre. De los cuales, el manantial termal Salitre (MTS) y el pozo la Norita (LN) presentan valores negativos de -370 mV y de -207 mV respectivamente. Lo cual, indica que existen condiciones reductoras o ganancia de electrones. El manantial termal Salitre y la dirección preferencial del flujo subterráneo, modifica las condiciones fisicoquímicas del pozo la Norita. Lo que se infiere que, un posible flujo regional asciende a través de la falla Obrajuelo y fluye a través del material poroso del subsuelo hasta llegar a mezclarse con los flujos intermedios y locales (Figura 75).

Los 13 pozos restantes, presentan valores positivos que van desde los 105 mV hasta los 519 mV. Esto indica que las condiciones son oxidantes o existe perdidas de electrones. Estos pozos se localizan en zonas alejadas del manantial termal Salitre o alejados de la zona de falla Obrajuelo (Figura 76).

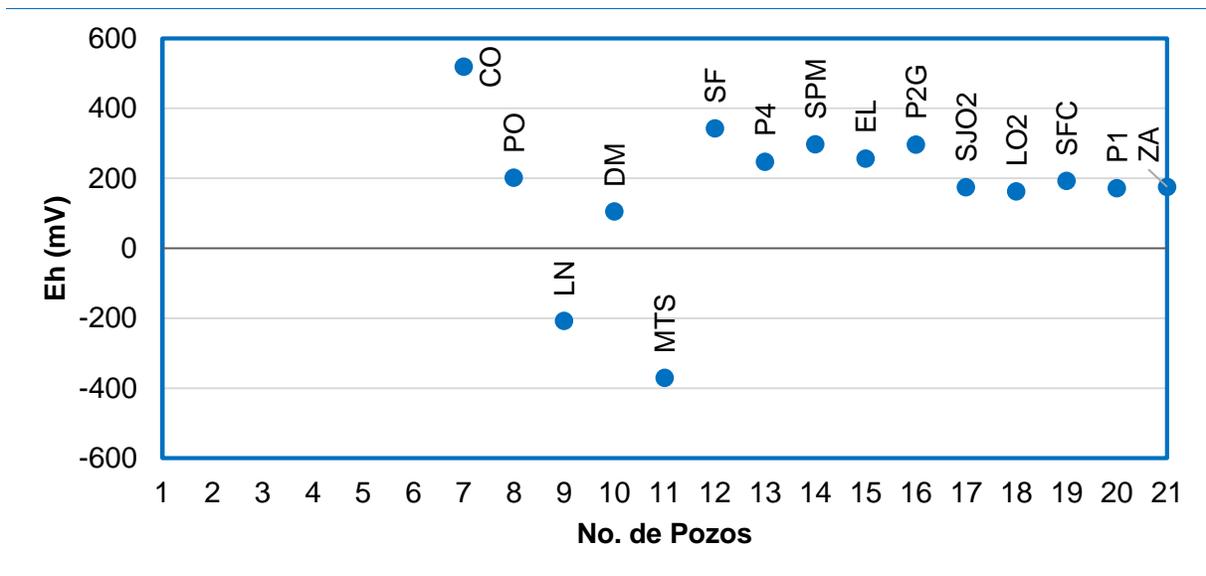


Figura 75. Gráfica de los valores de Eh de los pozos muestreados.
(Fuente: Elaboración propia).

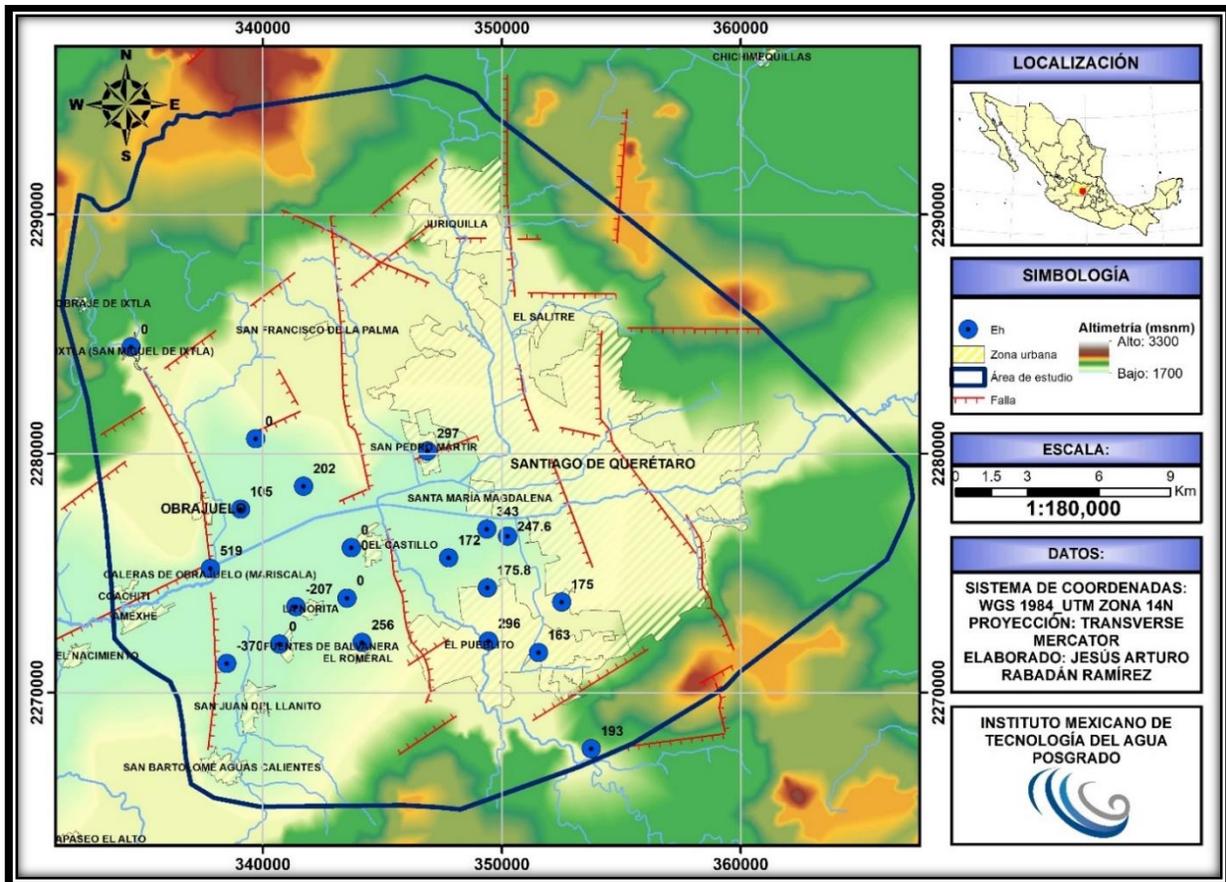


Figura 76. Mapa de la variación espacial de los datos de Eh obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.7.4 Conductividad Eléctrica (CE)

El agua subterránea presentó conductividades desde 472 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 1090 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con una media de 682.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabla 23 y Figura 77). Estos resultados indican valores normales para aguas subterráneas que oscilan entre 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Custodio y Llamas, 1983; Werner, 1996).

Sin embargo, se puede notar una gran diferencia en el pozo Fuentes Balvanera (FB), La Norita (LN) y el manantial termal Salitre (MTS) que presentaron conductividades de 1090 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 413.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 989 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente. El aumento de la conductividad eléctrica depende de la interacción de agua y roca (disolución-precipitación), pero también puede ser provocada por la mezcla de aguas o flujos regionales. En la Figura 78 se muestra el mapa de la distribución espacial de las muestras de la conductividad eléctrica del agua subterránea en la zona de estudio.

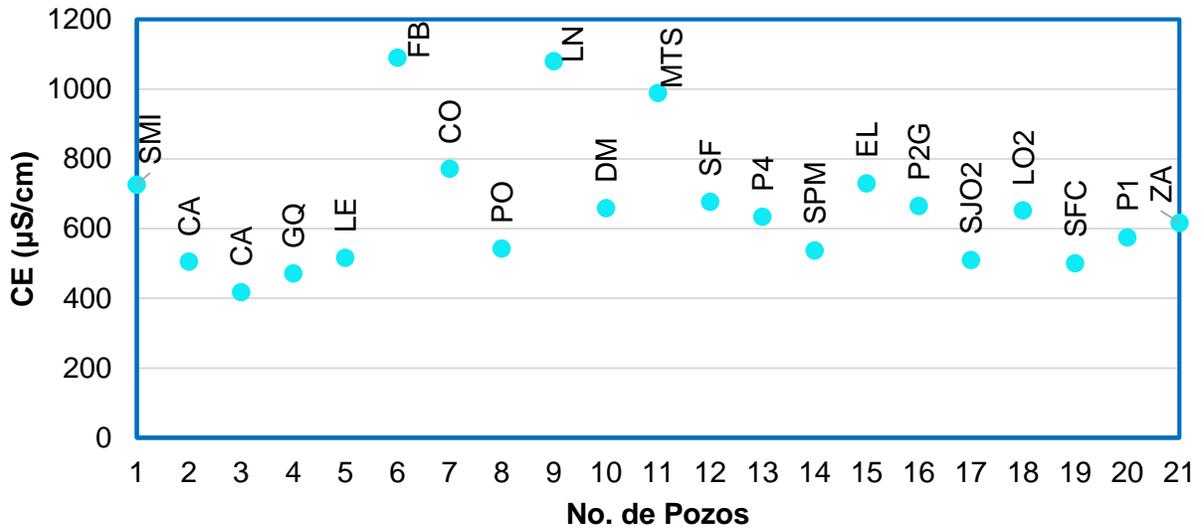


Figura 77. Gráfica de los valores de CE de los pozos muestreados. (Fuente: Elaboración propia).

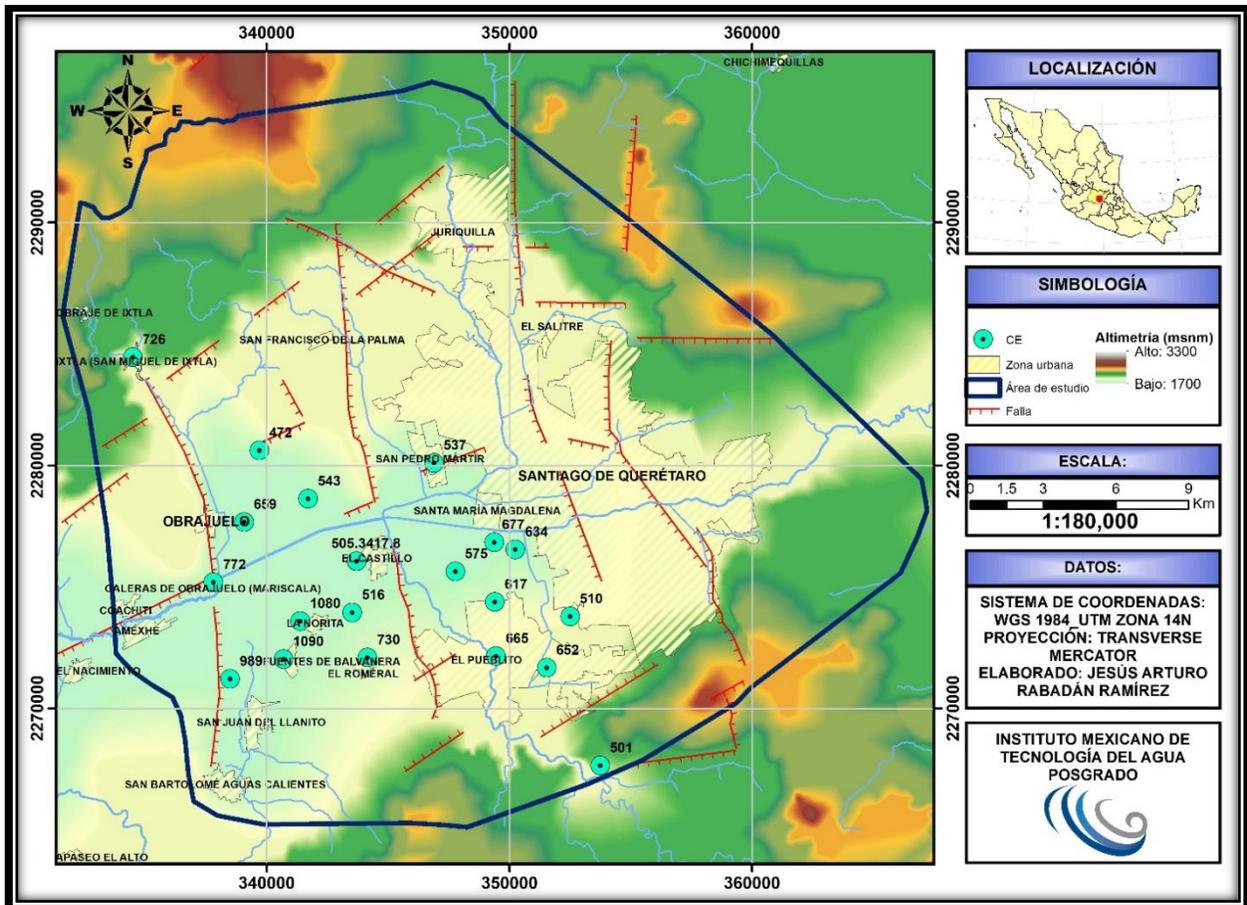


Figura 78. Mapa de la variación espacial de los datos de CE obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.7.5 Oxígeno Disuelto (OD)

El agua subterránea presentó valores de oxígeno disuelto que oscilan entre 0.8 mg/L a 6.4 mg/L y una media de 4 mg/L (Tabla 23 y Figura 79). Estas concentraciones de oxígeno disuelto en aguas subterráneas representan valores normales que están entre 0 y 5 mg/L (Custodio y Llamas, 1983; Werner, 1996).

Se puede observar que en el pozo La Norita (LN) y el manantial termal Salitre (MTS) presentaron concentraciones de oxígeno disuelto de 0.9 mg/L y 0.8 mg/L respectivamente, estos valores se correlacionan con los datos del potencial redox. Esto nos indica que el agua tiene mayor tiempo de residencia en el subsuelo y existe un ambiente reductor. En la Figura 80 se presenta la distribución espacial del oxígeno disuelto y se observa que las concentraciones menores a 1.0 mg/L se ubican al suroeste del valle y en los límites de la falla Obrajuelo.

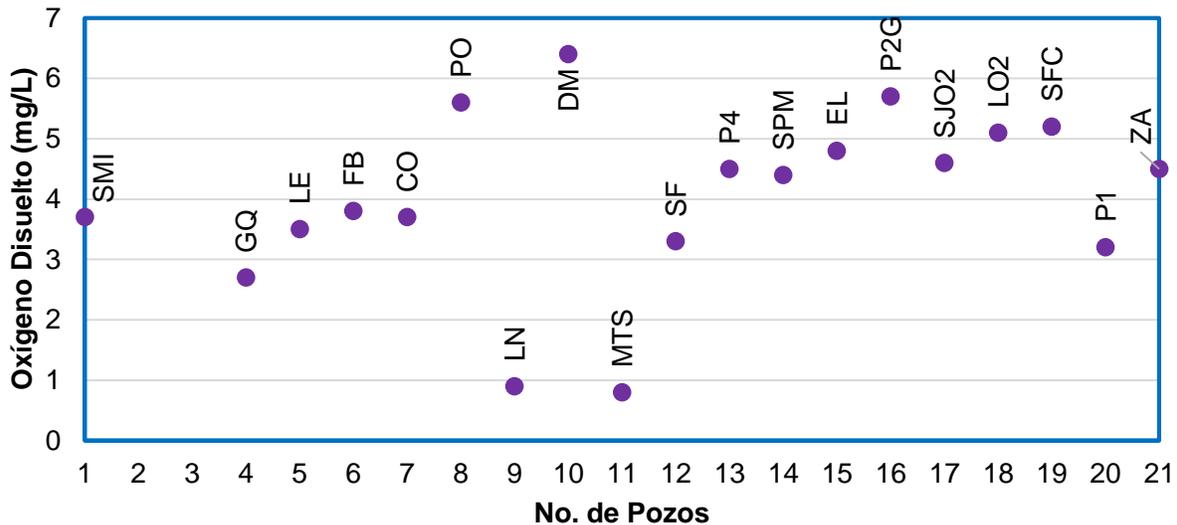


Figura 79. Gráfica de los valores de oxígeno disuelto.
(Fuente: Elaboración propia).

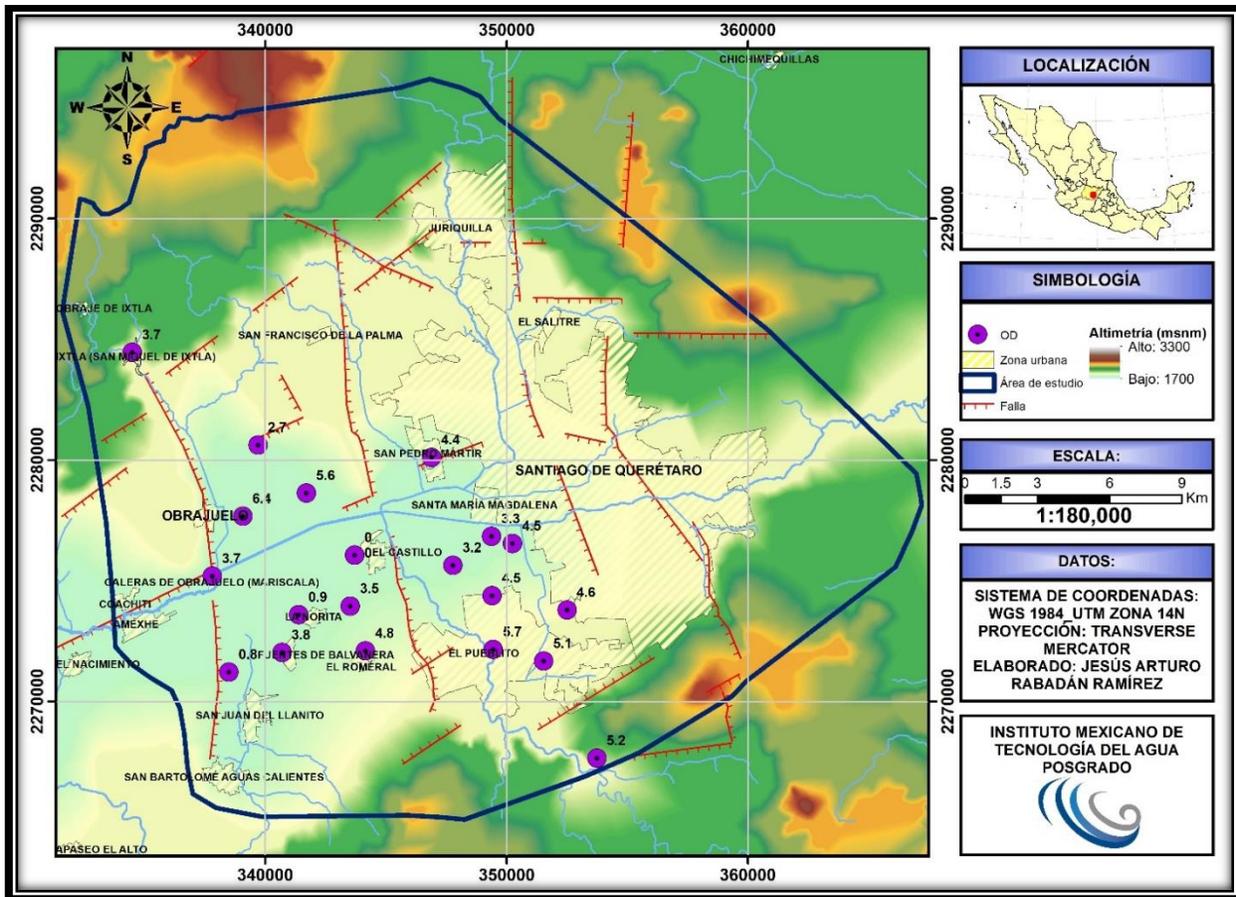


Figura 80. Mapa de la variación espacial de los datos de OD obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.7.6 Sólidos totales disueltos (STD)

Los valores de los sólidos totales disueltos medidos en el agua subterránea van desde los 133.5 mg/L a 451.8 mg/L y una media de 223.52 mg/L (Tabla 23 y Figura 81). Estas concentraciones de STD en el agua subterránea representan valores que están por debajo de la NOM-127-SSA1-1994 que establece un límite permisible de 1000 mg/L.

El 86 % de las muestras oscilan entre el 133.5 mg/L a 295 mg/L, sin embargo, en la zona suroeste del área de estudio el pozo Fuentes Balvanera (FB) y La Norita (LN) presentaron valores de 451.8 mg/L y 413.5 mg/L respectivamente. La concentración de STD de estos pozos están por arriba de la media, posiblemente están influenciados por el manantial termal Salitre y por la mezcla de flujos de tipo regional (Figura 82).

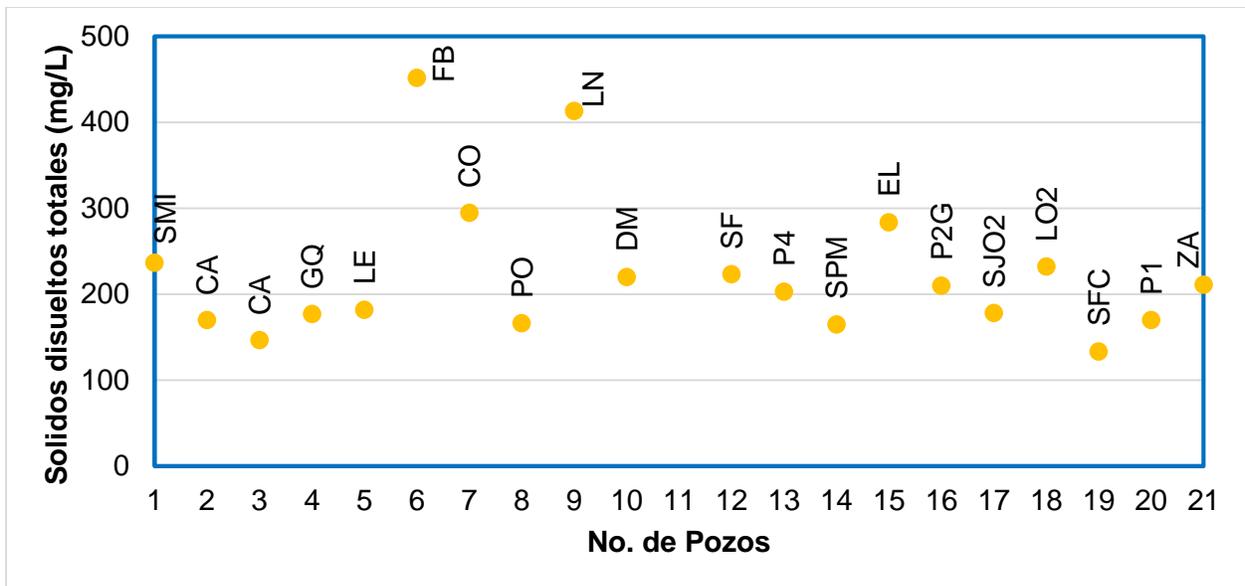


Figura 81. Gráfica de los valores de STD.
(Fuente: elaboración propia).

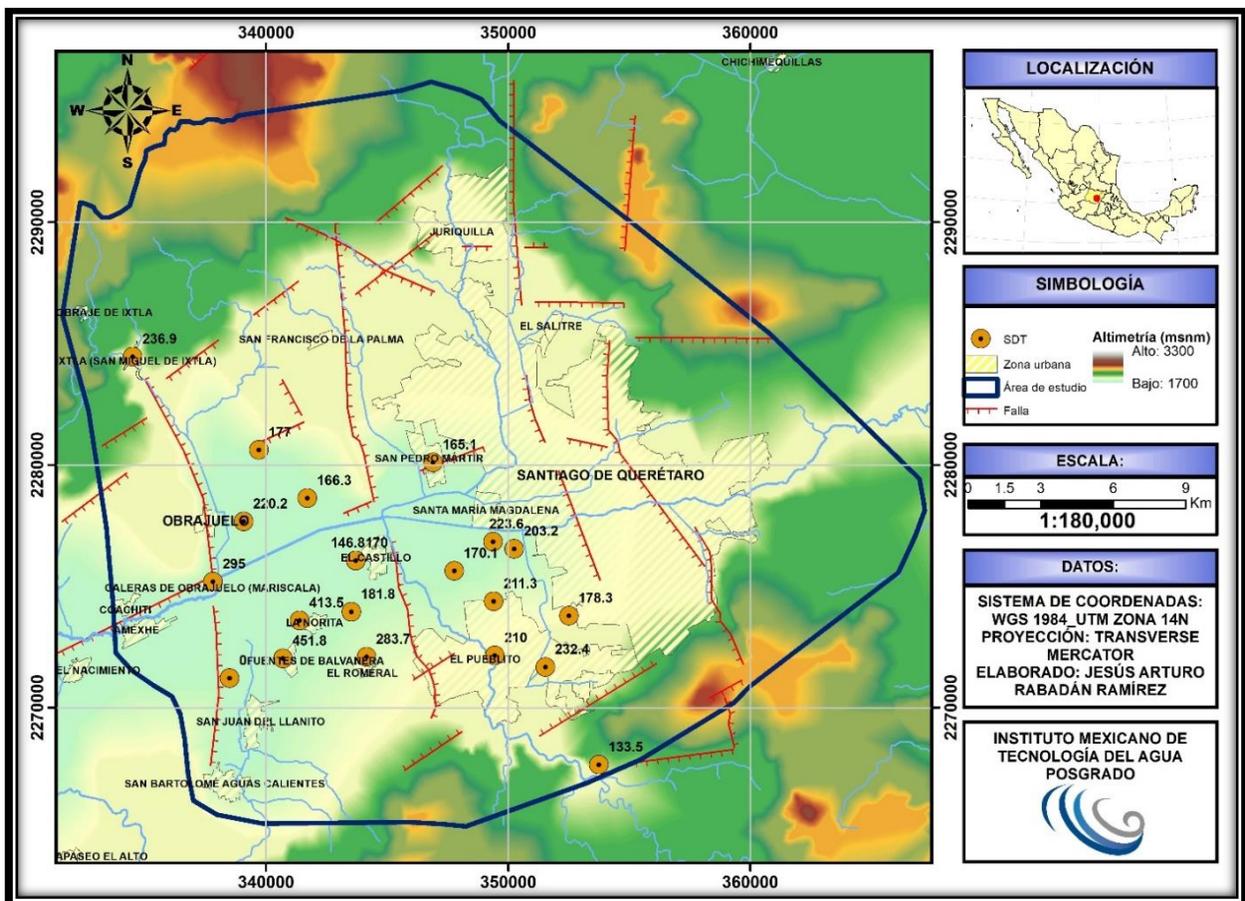


Figura 82. Mapa de la variación espacial de los datos de STD obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.7.7 Iones mayoritarios

5.7.7.1 Sodio (Na^+)

Las concentraciones de sodio van de los 49.5 mg/L a los 201.4 mg/L, con una media de 83.6 mg/L. En la Figura 83, se muestra el mapa de la distribución espacial de sodio, las mayores concentraciones se ubican en los pozos la Norita y Fuentes Balvanera asociados a la presencia del manantial termal Salitre por el ascenso de flujos regionales. Estas concentraciones de sodio en el agua subterránea representan valores que están por el límite de la NOM-127-SSA1-1994 que establece un límite permisible de 200 mg/L.

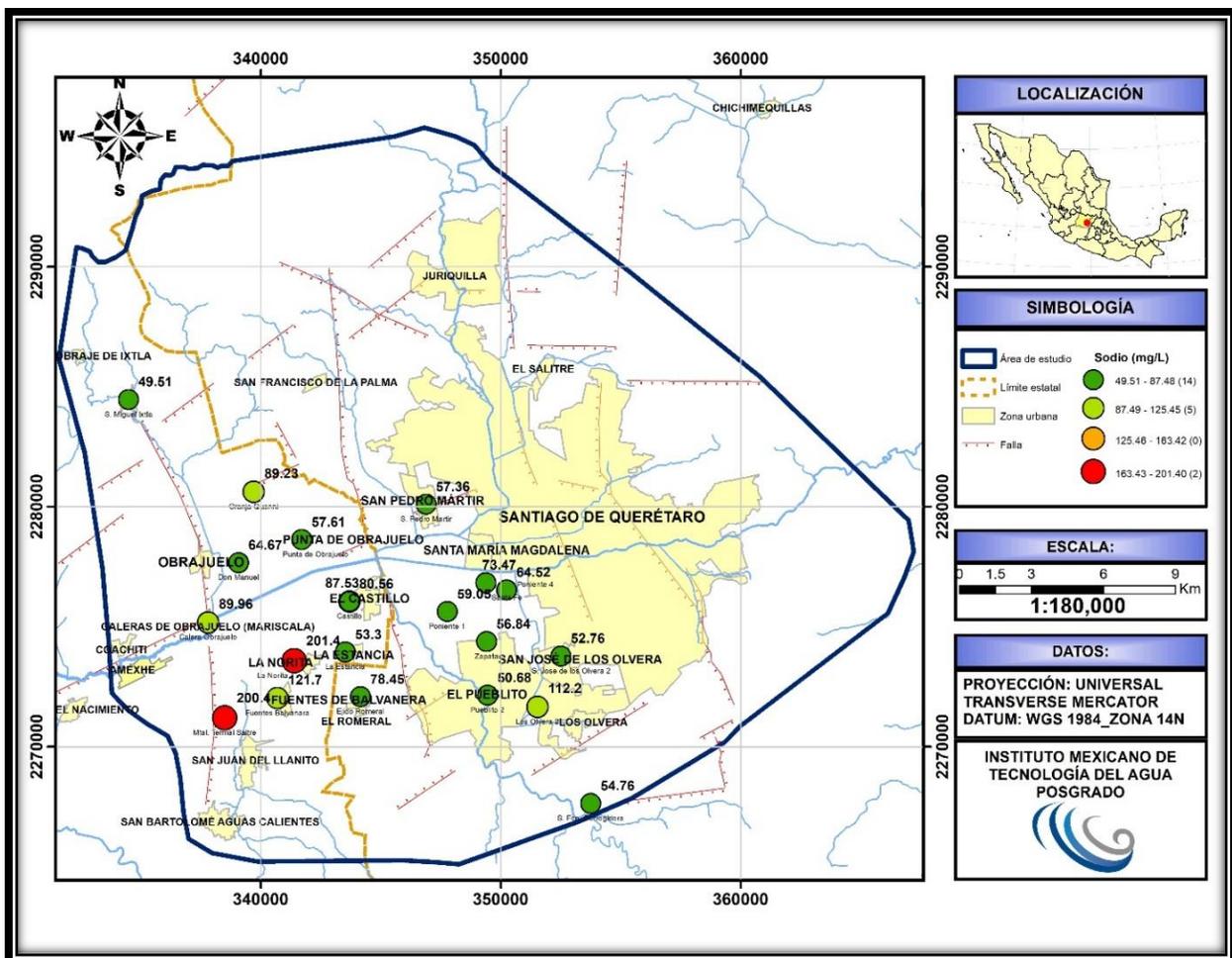


Figura 83. Mapa de la variación espacial de los datos de sodio obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.7.7.2 Potasio (K⁺)

Los valores de potasio van de los 5.23 mg/L a los 18.04 mg/L, con una media de 11.65 mg/L. Los valores más altos de potasio se localizan en la zona al suroeste del área de estudio y se encuentra el pozo la Norita, Fuentes Balvanera y Ejido Romeral. Esto es debido a la presencia geotermal o disolución de feldespatos alcalinos como la ortoclasa y sanidino o material arcilloso de composición potásica. La distribución de potasio se muestra en la Figura 84.

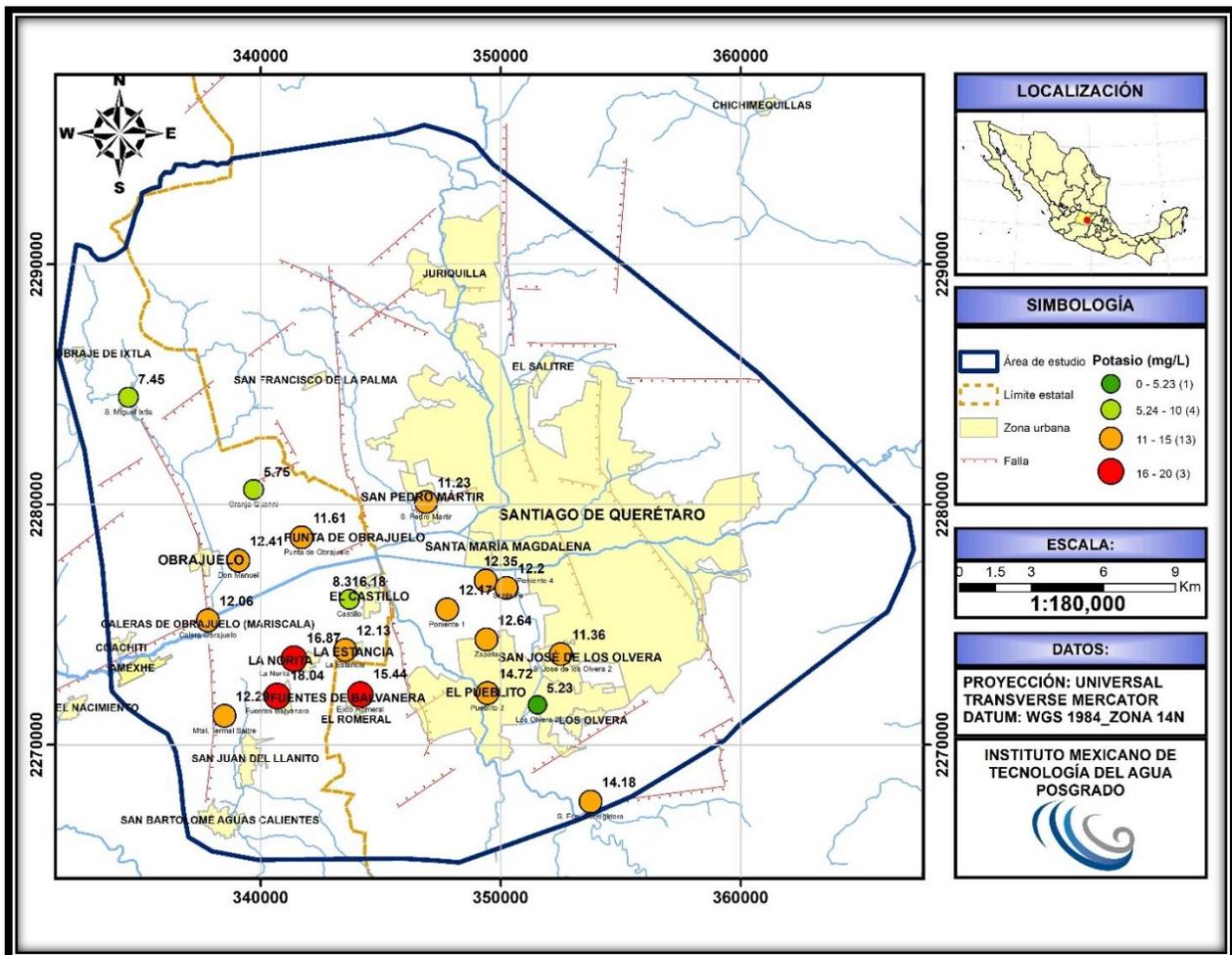


Figura 84. Mapa de la variación espacial de los datos de potasio obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.7.7.3 Calcio (Ca²⁺)

Las concentraciones de calcio van de los 0.8 mg/L a los 60.27 mg/L, con una media de 34.2 mg/L. Los valores más altos y representativos de calcio se localizan al noroeste y sureste del área de estudio y representan aguas de reciente infiltración debido a la poca actividad en el intercambio iónico y aún se conserva el calcio proveniente de la infiltración, estas muestras son: San Miguel Ixtla y Pueblito 2 como se muestra en el mapa de la Figura 85.

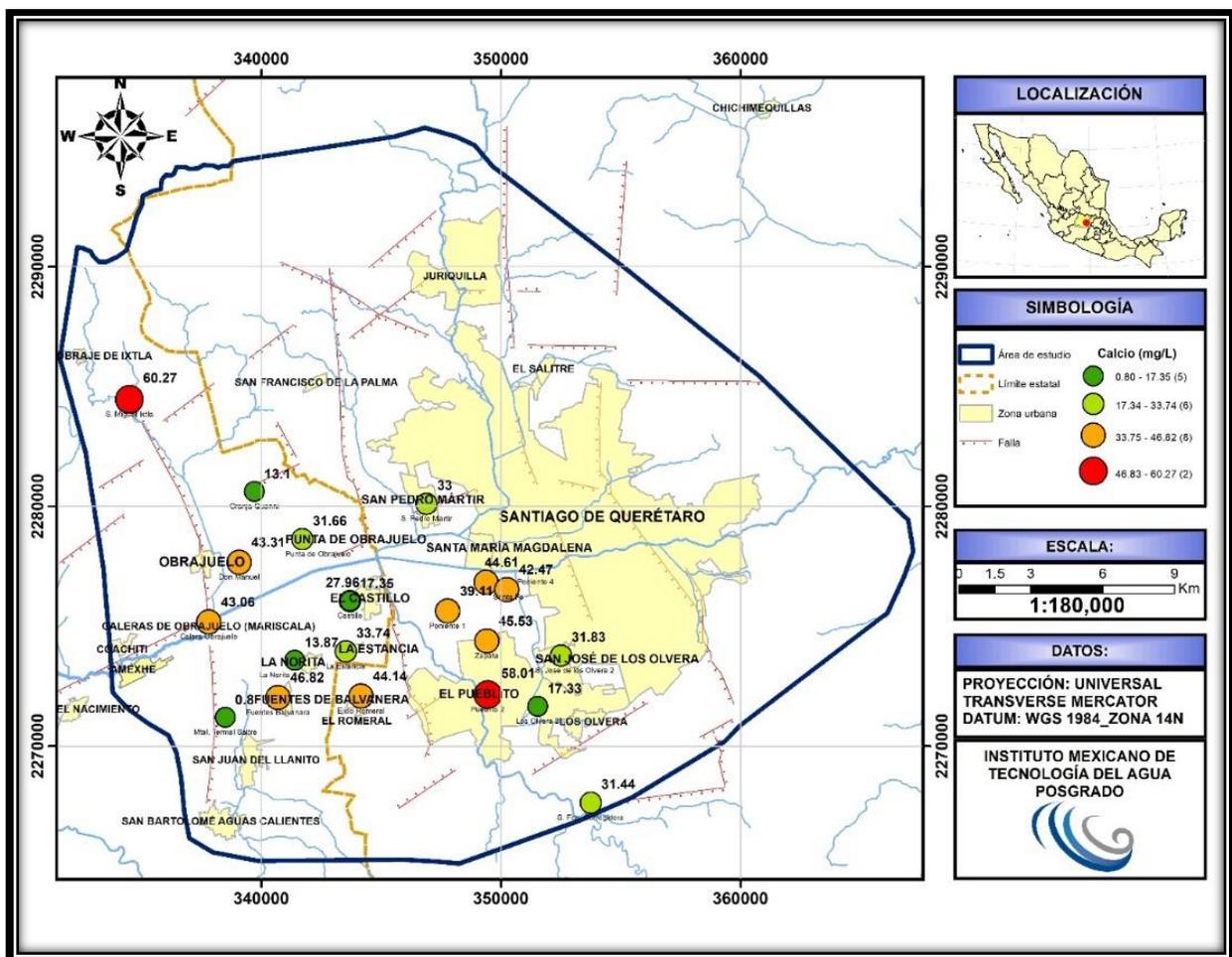


Figura 85. Mapa de la variación espacial de los datos de calcio obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.7.7.4 Magnesio (Mg²⁺)

Los valores de magnesio van de los 0.36 mg/L a los 31.6 mg/L, con una media de 11.6 mg/L. Las concentraciones magnesio son menores a las del calcio, sin embargo, tienen una íntima correlación. Esto por la posible disolución de rocas carbonatadas o volcánicas (magnésicas o ferromagnésicos). En el mapa de la Figura 86, se muestra la distribución espacial del magnesio.

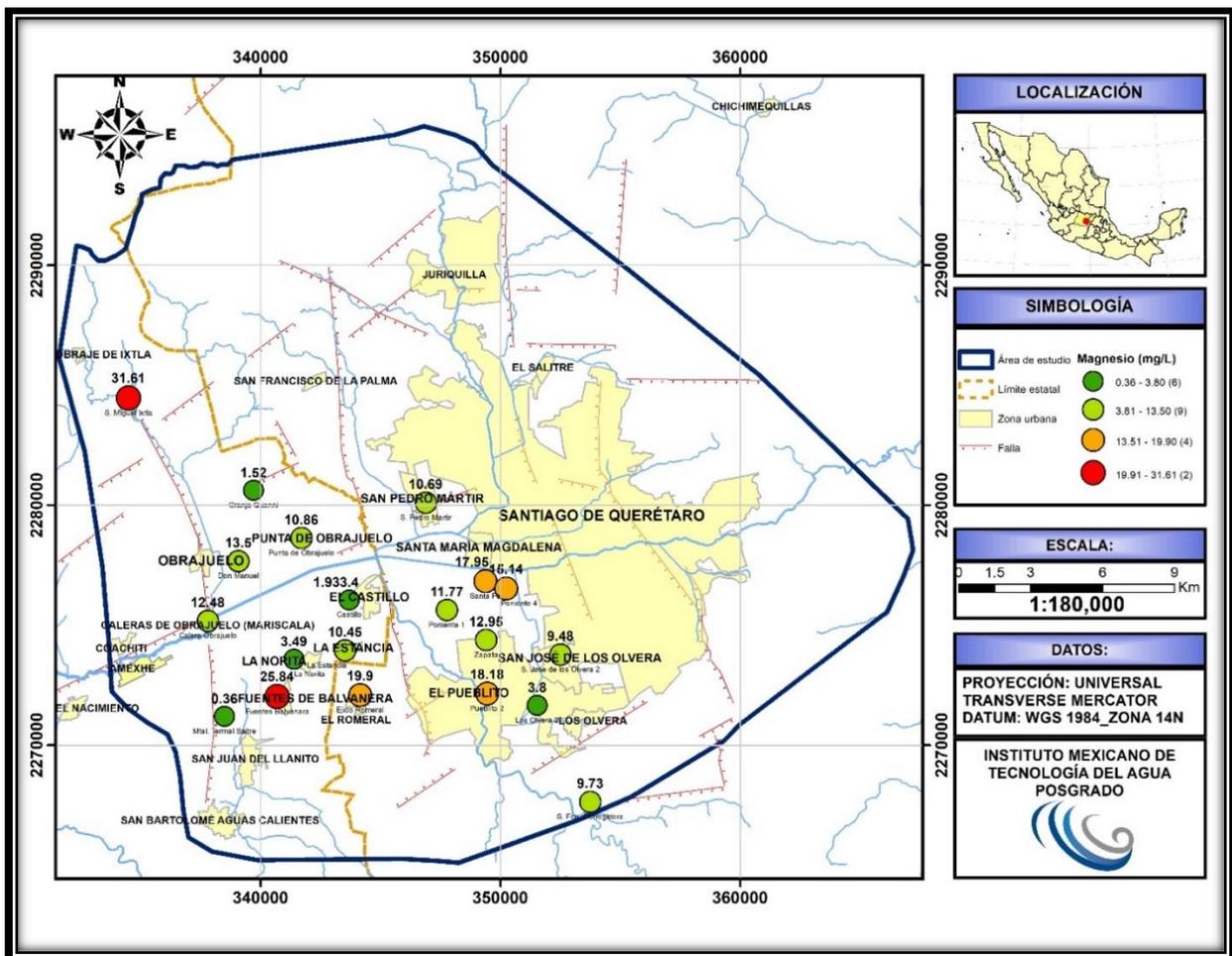


Figura 86. Mapa de la variación espacial de los datos de potasio obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.7.7.5 Cloruros (Cl⁻)

Las concentraciones de cloruros van de los 5.6 mg/L a los 121.2 mg/L, con una media de 29.9 mg/L. Los valores más altos de cloruros no rebasan el límite permisible de la norma NOM-127-SSA1-1994 que establece un límite permisible de 250 mg/L. Sin embargo, las altas concentraciones se localizaron al suroeste del área de estudio. El origen del ion cloruro es causado por la presencia de fuentes hidrotermales, en especial la muestra del manantial termal Salitre, Fuentes Balvanera y la Norita (Figura 87). La relación iónica de cloruro y bicarbonatos va de los 0.04 a 0.82 y se ubica en un rango de $0 < r_{Cl}/r_{HCO} < 5$, lo que significa que las muestras del agua subterránea tienen un origen continental.

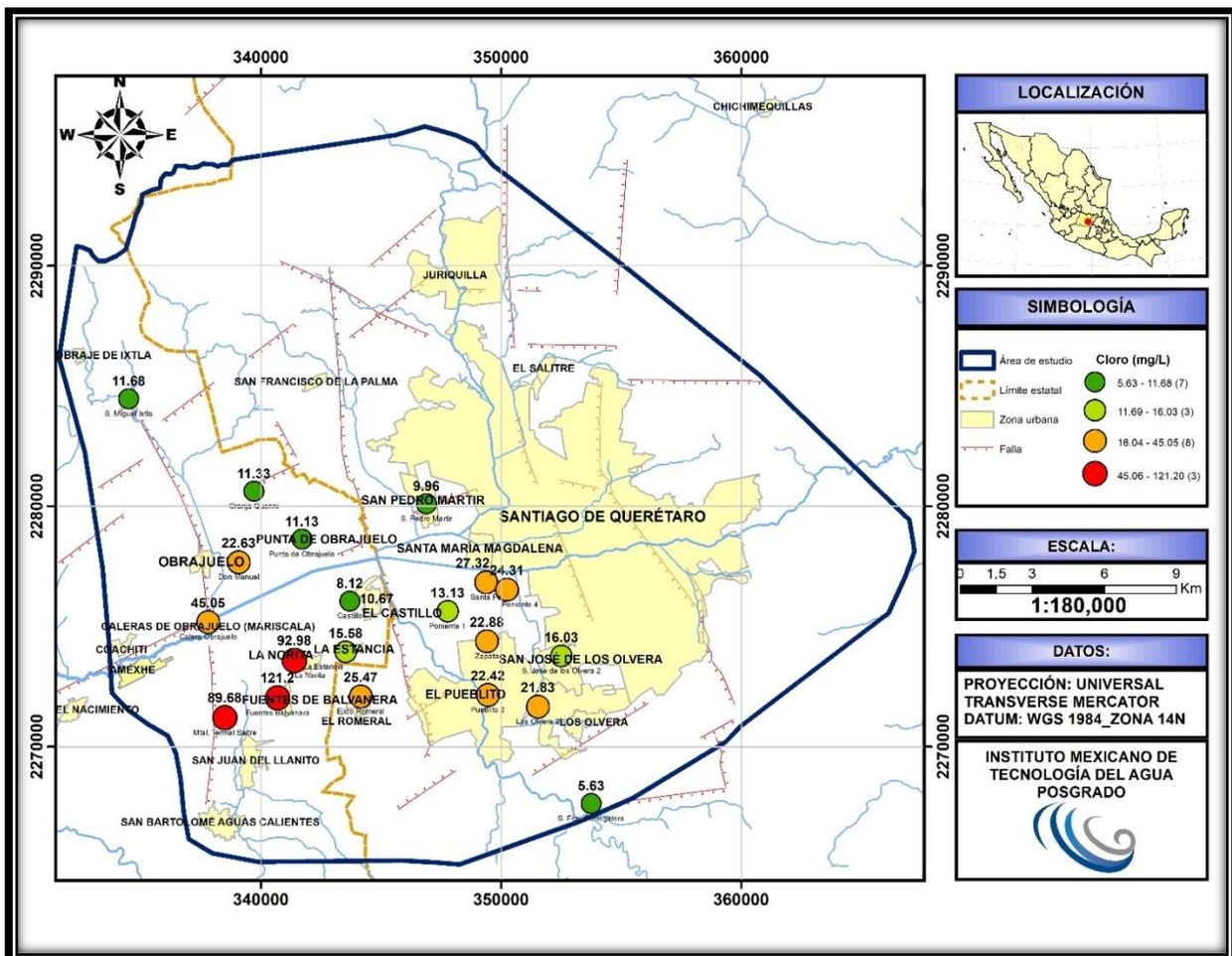


Figura 87. Mapa de la variación espacial de los datos de cloruros obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.7.7.6 Sulfatos (SO_4^{2-})

Las muestras del agua subterránea presentan valores de sulfatos que van de los 15.7 mg/L a los 93.9 mg/L, con una media de 45.2 mg/L. Estas concentraciones de sulfatos no rebasan el límite permisible de la norma NOM-127-SSA1-1994 que establece un límite de 400 mg/L. Las altas concentraciones de sulfatos registradas en el área de estudio van de los 40 mg/L a los 93 mg/L, corresponden al pozo Fuentes Balvanera, Ejido Romeral, Calera Obrajuelo, Don Manuel, la Norita, Zapata, los Olvera 2 y San José de los Olvera 2. El posible origen de los sulfatos debe a la gran actividad agrícola que existe en la zona (Figura 88).

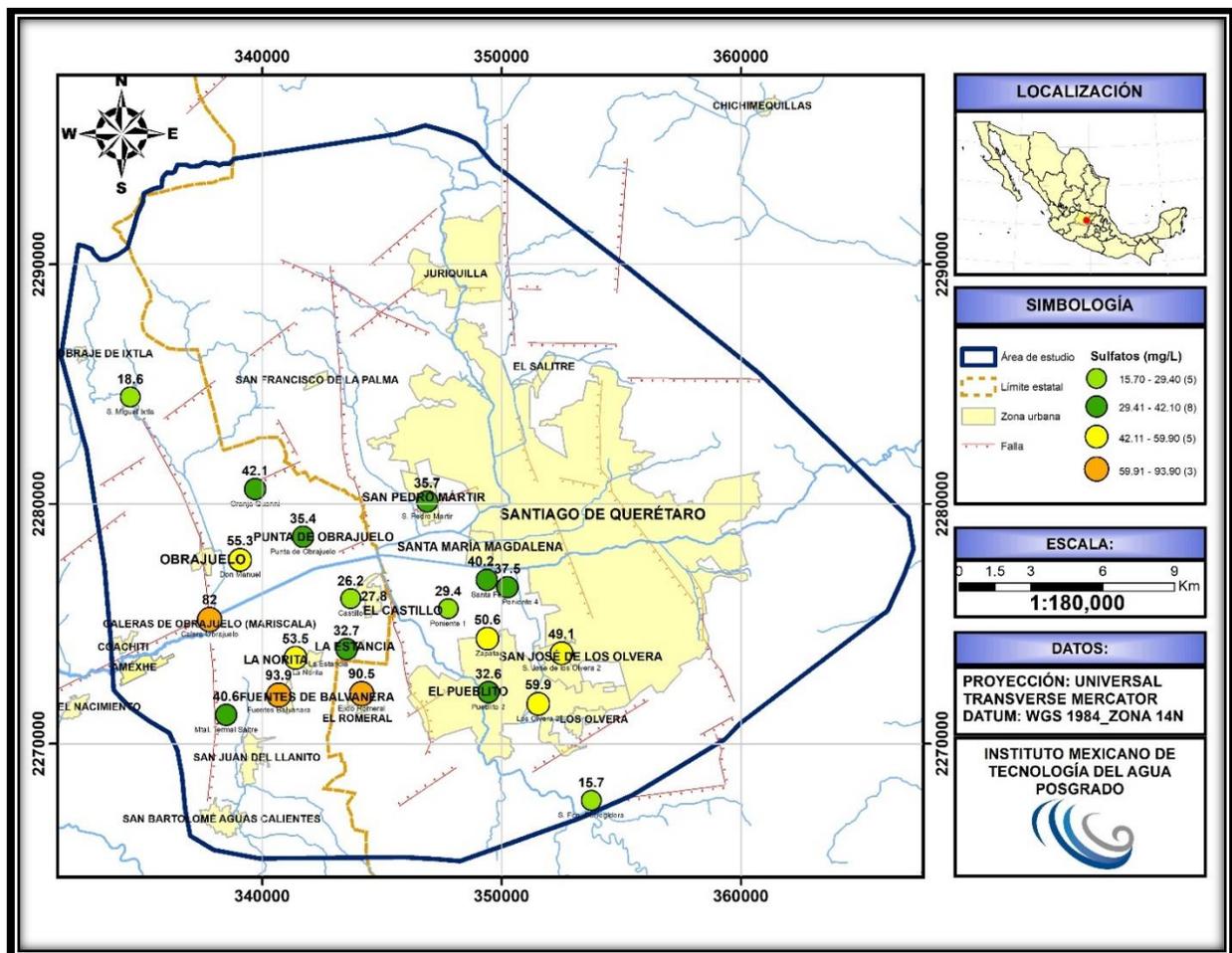


Figura 88. Mapa de la variación espacial de los datos de sulfatos obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.7.7.8 Nitratos (NO_3^-)

Las concentraciones de nitratos presentes en el agua subterránea van de los 0.28 mg/L a los 56.4 mg/L, con una media de 22.5 mg/L. El 66% de las muestras de agua sobrepasan el límite permisible de la norma NOM-127-SSA1-1994 que establece un límite de 10 mg/L. Las altas concentraciones de nitratos van de los 11.5 mg/L a los 56.4 mg/L. Una de las posibles causas de las altas concentraciones de nitratos es por la intensa actividad agrícola y sus fertilizantes aplicados en la zona de estudio (Figura 90).

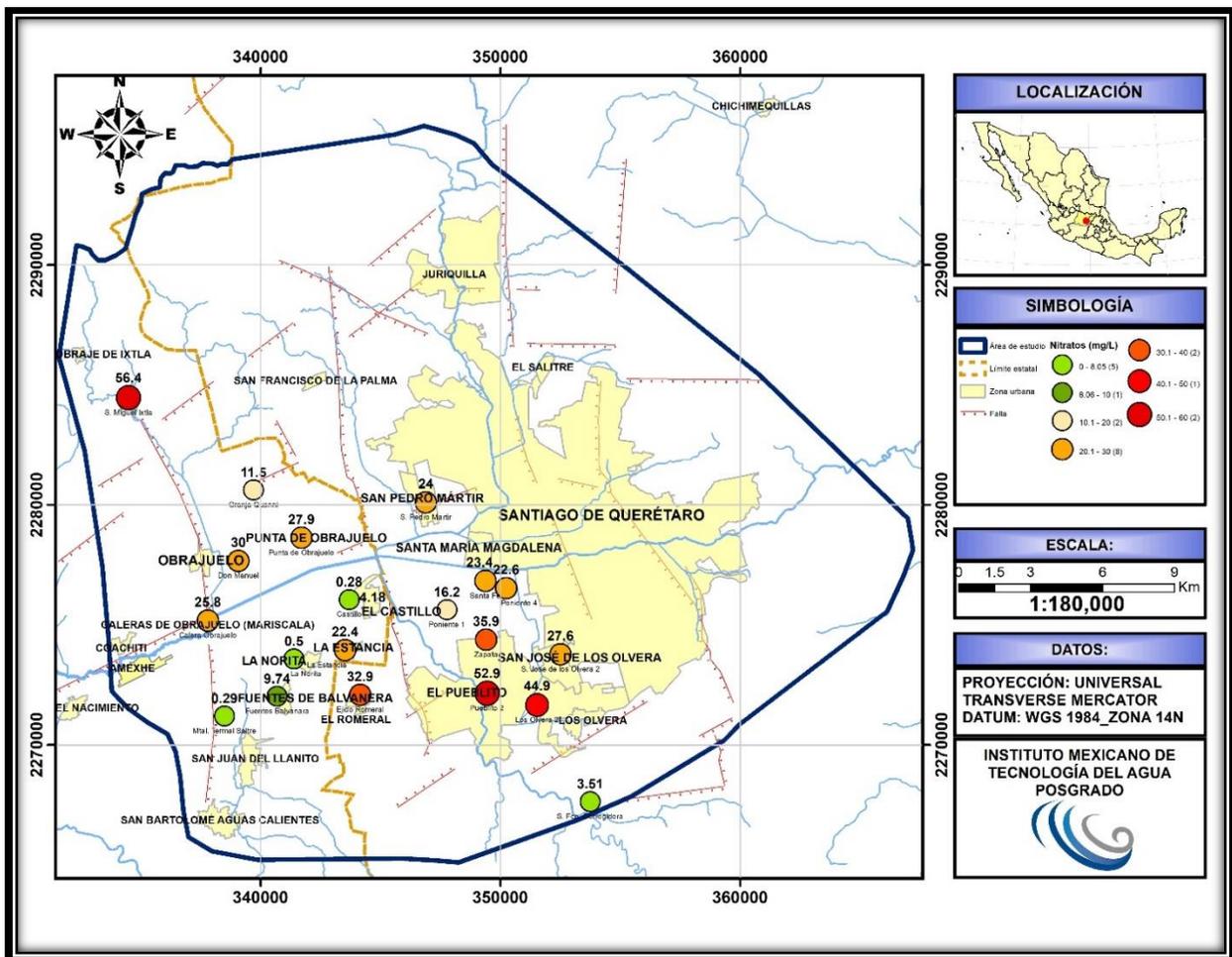


Figura 90. Mapa de la variación espacial de los datos de nitratos obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.7.8 Iones minoritarios

5.7.8.1 Boro (B³⁺)

Las concentraciones de boro en el agua subterránea van de los 0.005 mg/L a los 3.4 mg/L, con una media de 0.5 mg/L. Se encontraron 3 muestras de agua donde las concentraciones fueron las más altas de boro y que corresponden al manantial termal Salitre, Fuentes Balvanera y la Norita que van de los 11.3 mg/L a los 19.4 mg/L (Figura 91). El boro tiene diversos orígenes, sin embargo, los valores por arriba de los 10 mg/L son representativos para aguas termales de ambientes volcánicos que corresponde a la zona suroeste del área de estudio.

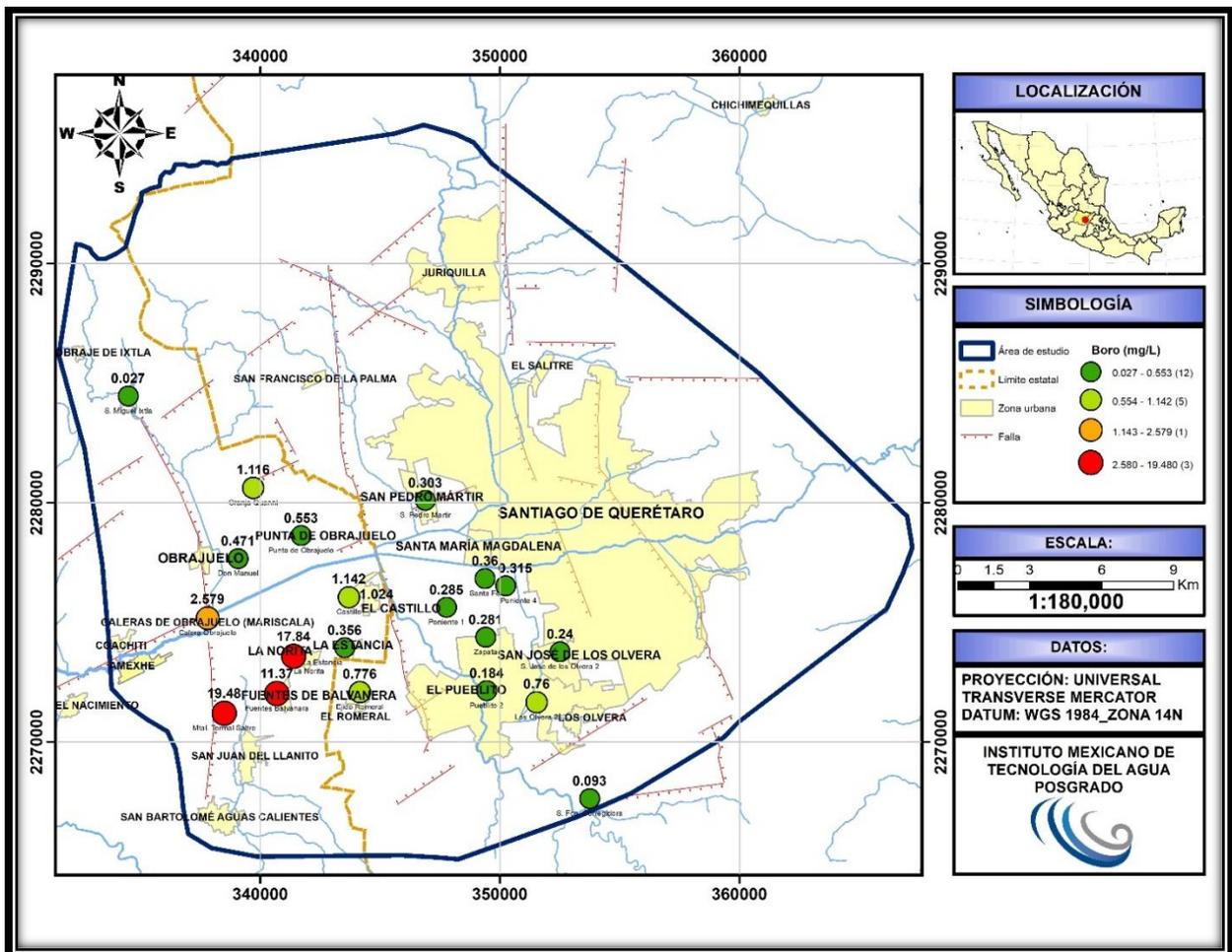


Figura 91. Mapa de la variación espacial de los datos de boro obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.7.8.2 Fluoruros (F⁻)

Las concentraciones de fluoruro en el agua subterránea van de los 0.16 mg/L a los 23 mg/L, con una media de 2.1 mg/L. Se encontraron 3 muestras de agua que sobrepasan el límite permisible de flúor de la norma NOM-127-SSA1-1994 que establece un límite de 1.5 mg/L. Las altas concentraciones de flúor corresponden al manantial Salitre con 23 mg/L, la Norita con 11.36 mg/L y el pozo Balvanera con 1.8 mg/L. El posible origen del fluoruro está asociado a la disolución de minerales como la fluorita (CaF₂), fluoroapatita (Ca₅(PO₄)₃F), criolita (Na₃AlF₆), villiaumita, (NaF), topacio (Al₂(SiO₄)F₂) y gases volcánicos. La Figura 92, se muestra la distribución espacial del fluoruro, donde se puede observar en la zona suroeste los valores más altos de fluoruro que se asocian al ascenso de flujos regionales a través de la falla Obrajuelo.

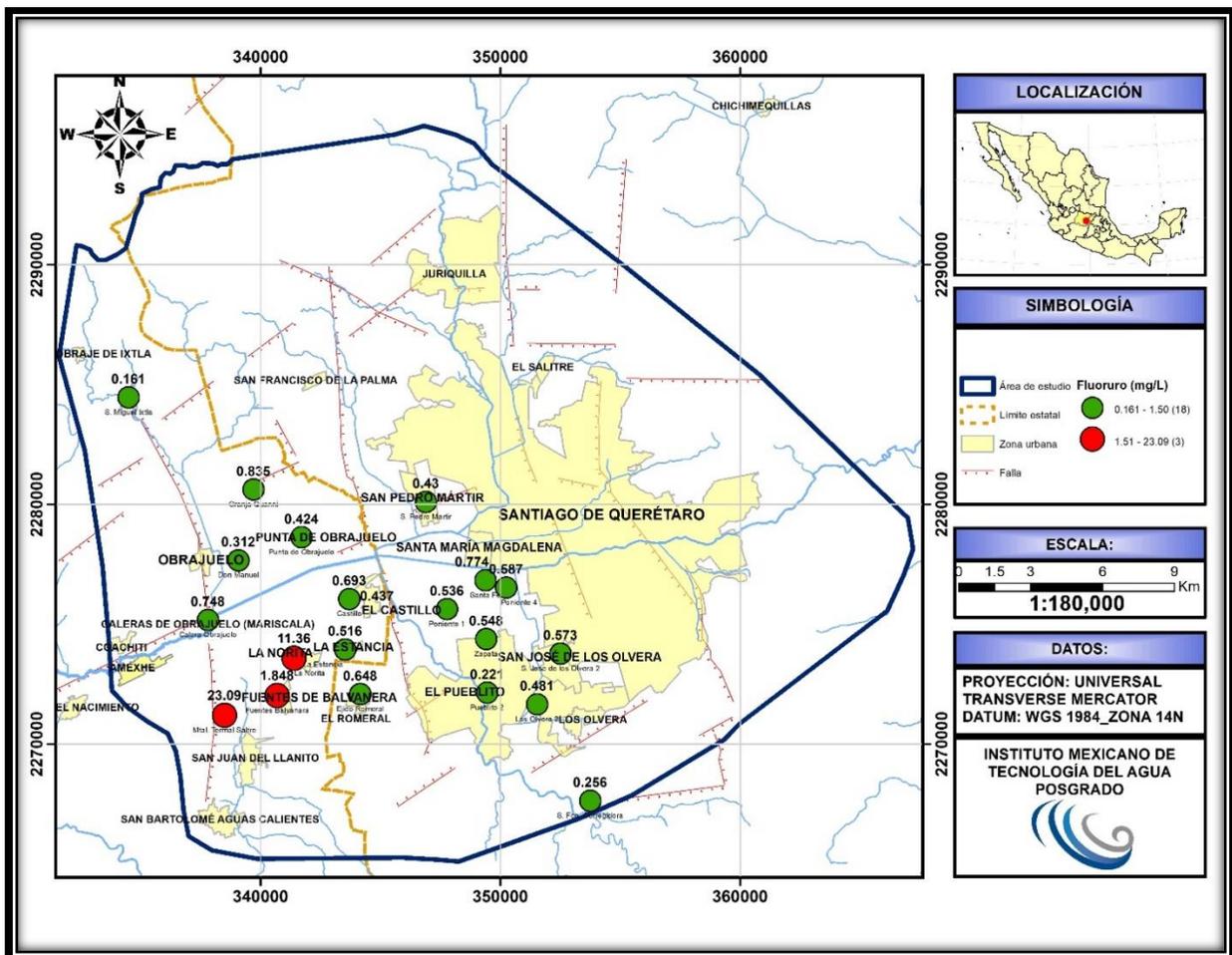


Figura 92. Mapa de la variación espacial de los datos de fluoruros obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.7.8.3 Hierro (Fe)

Las concentraciones de hierro total presentes en el agua subterránea van de los 0.002 mg/L a los 0.34 mg/L y una media de 0.17 mg/L. De las 21 muestras de agua analizadas, 3 presentan valores que sobrepasa el límite permisible de la norma NOM-127-SSA1-1994 que establece un límite de 0.3 mg/L. Estas muestras pertenecen al pozo Castillo de 150 m de profundidad (0.47 mg/L), Castillo a 200 m (1.10 mg/L) y la Norita (0.63 mg/L). Las muestras se ubican en el mapa de la Figura 93, donde el posible origen de este elemento traza es natural, relacionado a la actividad geotermal de la zona del manantial termal Salitre.

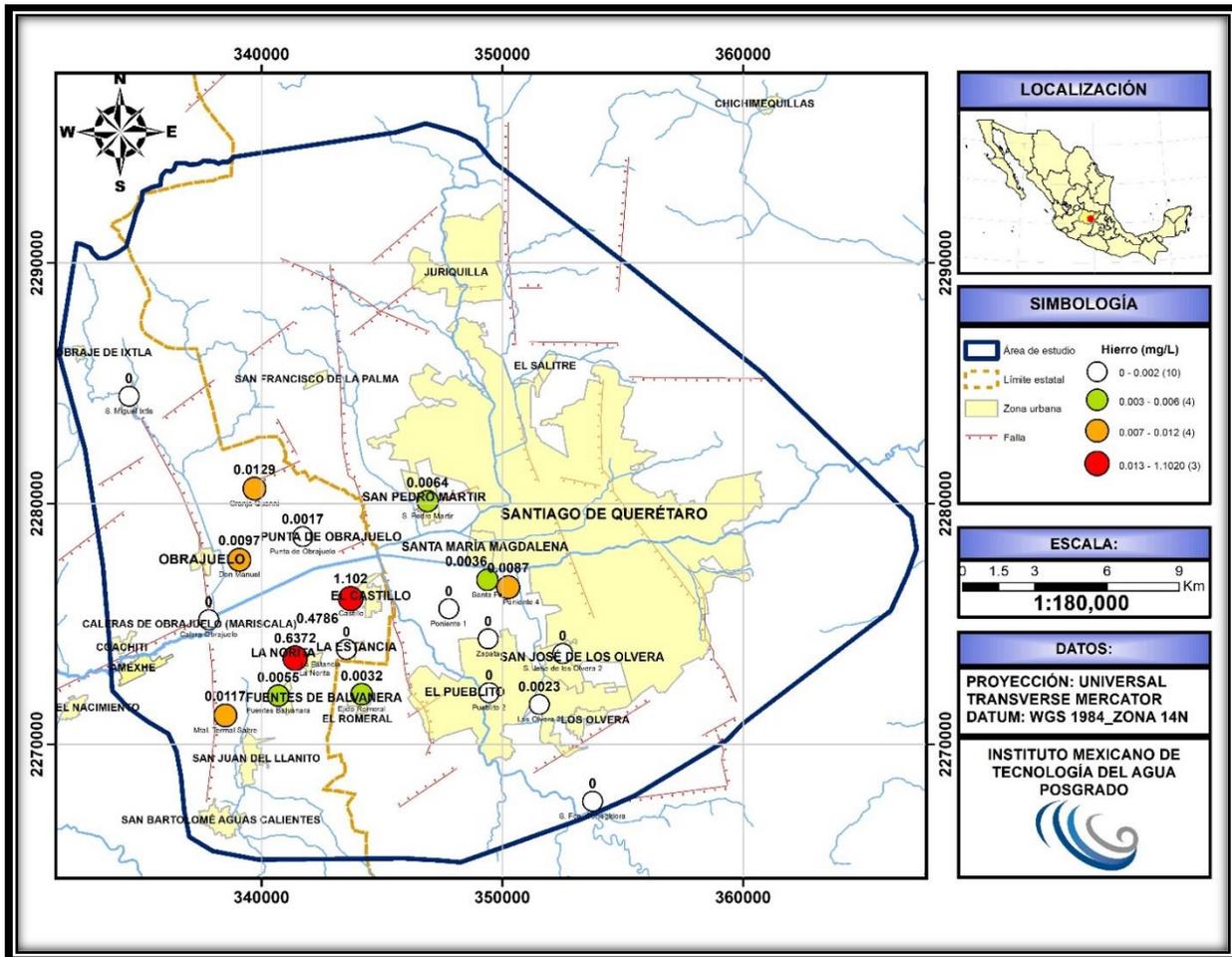


Figura 93. Mapa de la variación espacial de los datos de hierro obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.7.8.4 Litio (Li⁺)

El mapa de la Figura 94, se muestra la distribución espacial del litio, cuyos valores van de los 0.2 mg/L a los 1.4 mg/L y una media de 0.2 mg/L.

Principalmente en la zona suroeste del área de estudio, se presentan las altas concentraciones de litio que corresponden al manantial termal Salitre, la Norita, Fuentes Balvanera, Calera Obrajuelo y el Castillo. Se plantea que el origen del litio está relacionado a flujos regionales de origen termal.

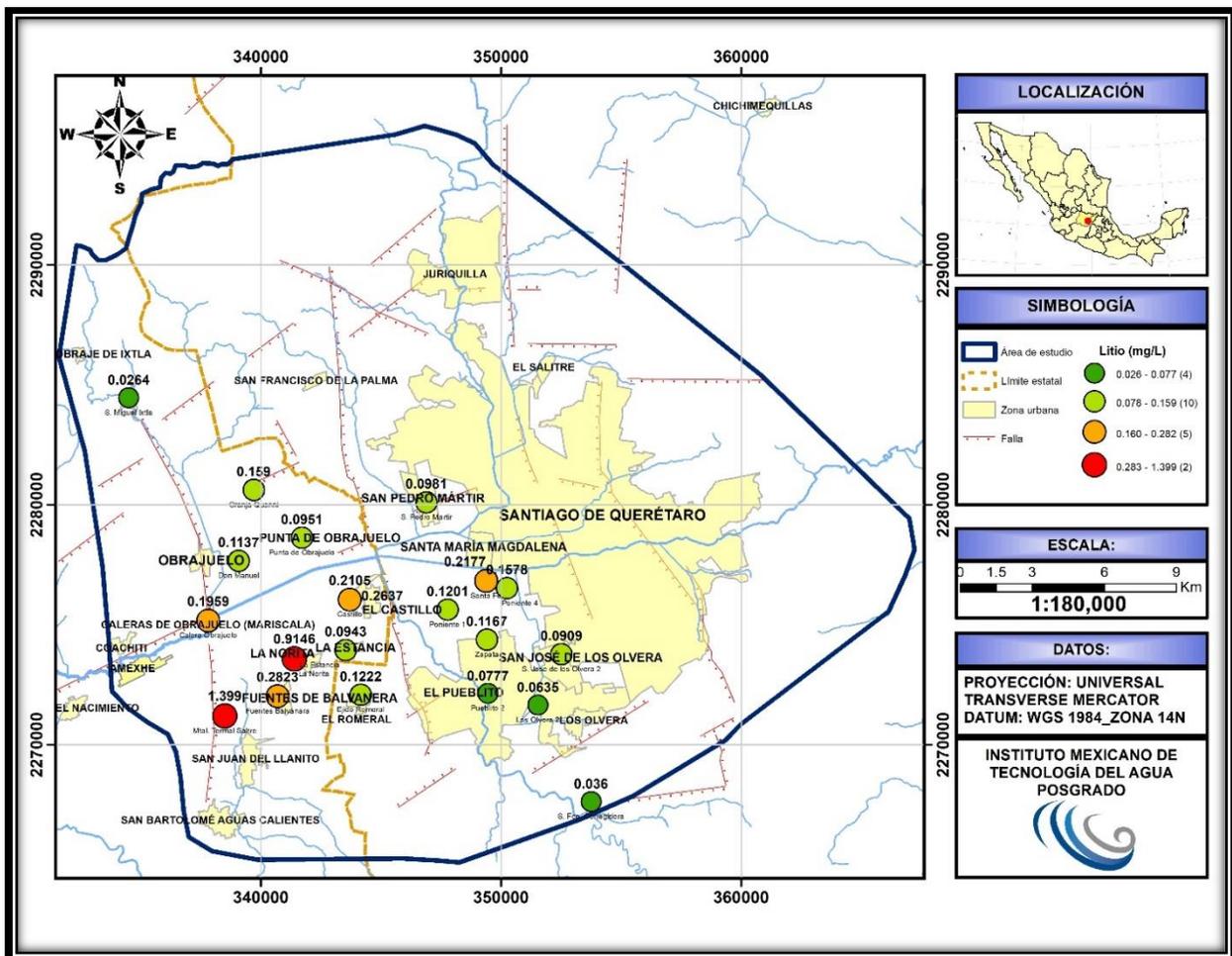


Figura 94. Mapa de la variación espacial de los datos de litio obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.7.9.2 Arsénico (As)

De total de las muestras de agua analizadas, solo se encontró arsénico total en el pozo la Norita con un valor de los 0.05 mg/L. Dicho valor sobrepasa el límite permisible de la norma NOM-127-SSA1-1994 que establece un límite de 0.025 mg/L. La posible fuente de este elemento traza es de origen natural, relacionado a la actividad geotermal de la zona del manantial termal Salitre (Figura 96).

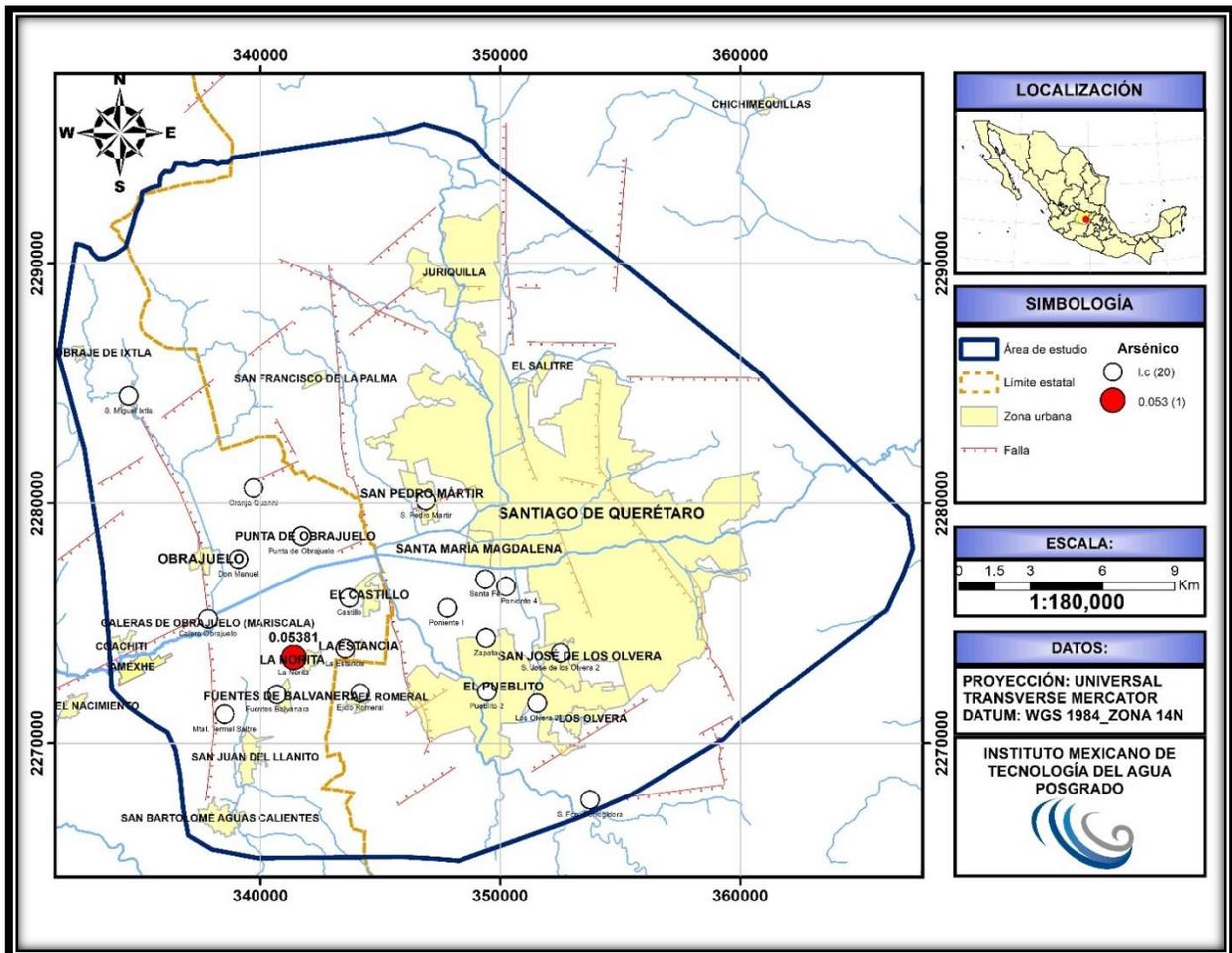


Figura 96. Mapa de la variación espacial de los datos de arsénico obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.7.9.3 Cadmio (Cd²⁺)

El contenido de cadmio se registró en dos muestras de agua pertenecientes al pozo el Castillo a 150 m con un valor de 0.38 mg/L y el Castillo a 200m de 0.55 mg/L, dichos valores están por arriba de lo establecido por la norma NOM-127-SSA1-1994 que establece un límite permisible de 0.005 mg/L, sin embargo, el agua es utilizada para el riego agrícola (Figura 97). Se puede interpretar que a mayor profundidad este el agua subterránea mayor es la concentración de cadmio.

La fuente principal de cadmio tiene un posible origen natural, relacionado a la actividad geotermal de la zona del manantial termal Salitre o flujos regionales (Figura 97).

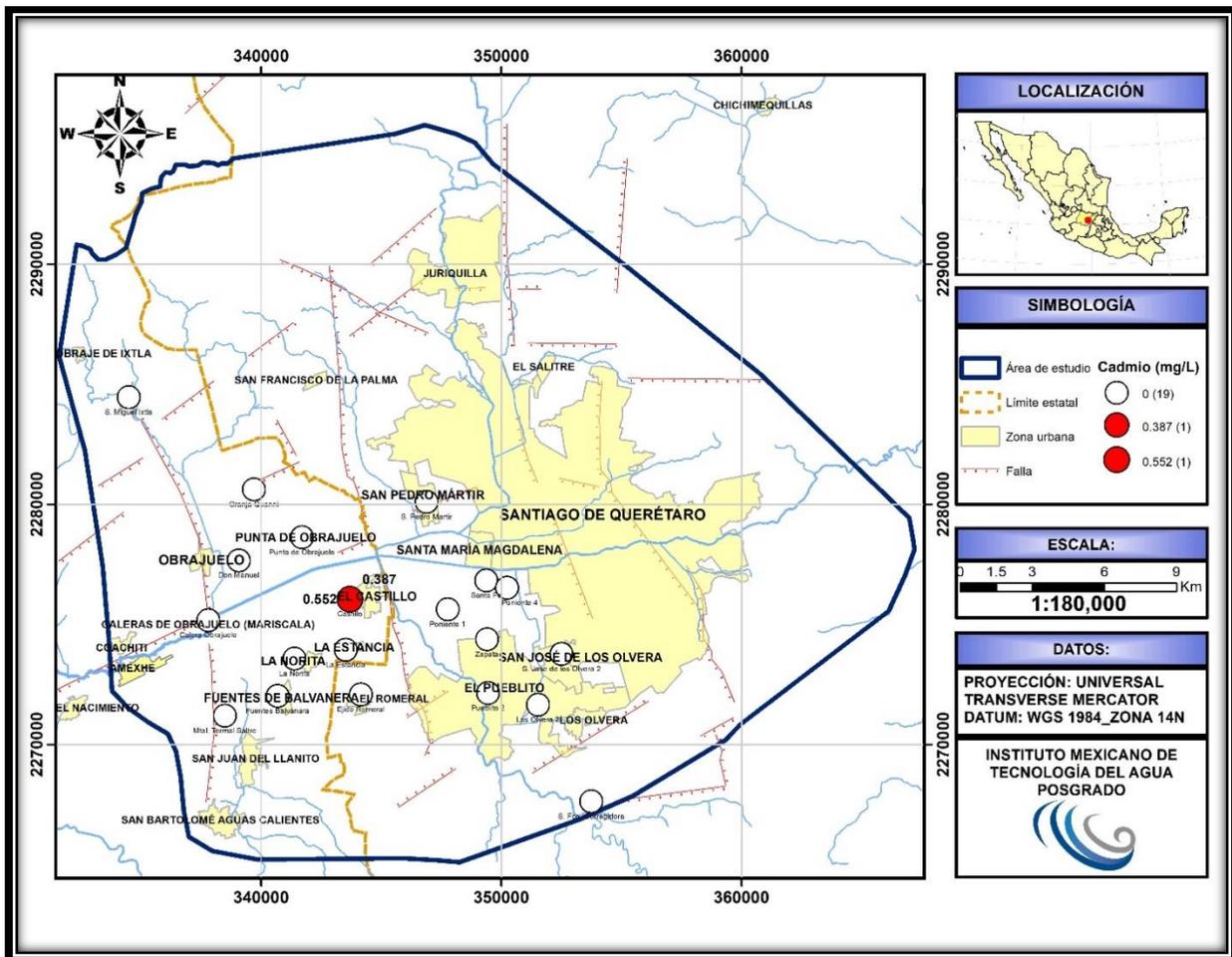


Figura 97. Mapa de la variación espacial de los datos de cadmio obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.7.9.4 Plomo (Pb²⁺)

Las concentraciones de plomo presentes en el agua subterránea van de los 0.008 mg/L a los 0.23 mg/L, con una media de 0.011 mg/L. El 99% de las muestras de agua están ligeramente por arriba del límite permisible de la norma NOM-127-SSA1-1994 que establece un límite de 0.01 mg/L. Sin embargo, la muestra del manantial termal Salitre presenta un valor de 0.23 mg/L sobrepasando el límite permisible de la NOM-127-SSA1-1994. La muestra se ubica al suroeste del área de estudio y presenta una correlación con los elementos de aluminio y fluoruros que tienen un posible origen natural y representativo para aguas termales de ambientes volcánicos provocados por la disolución de minerales sulfurados (Figura 98).

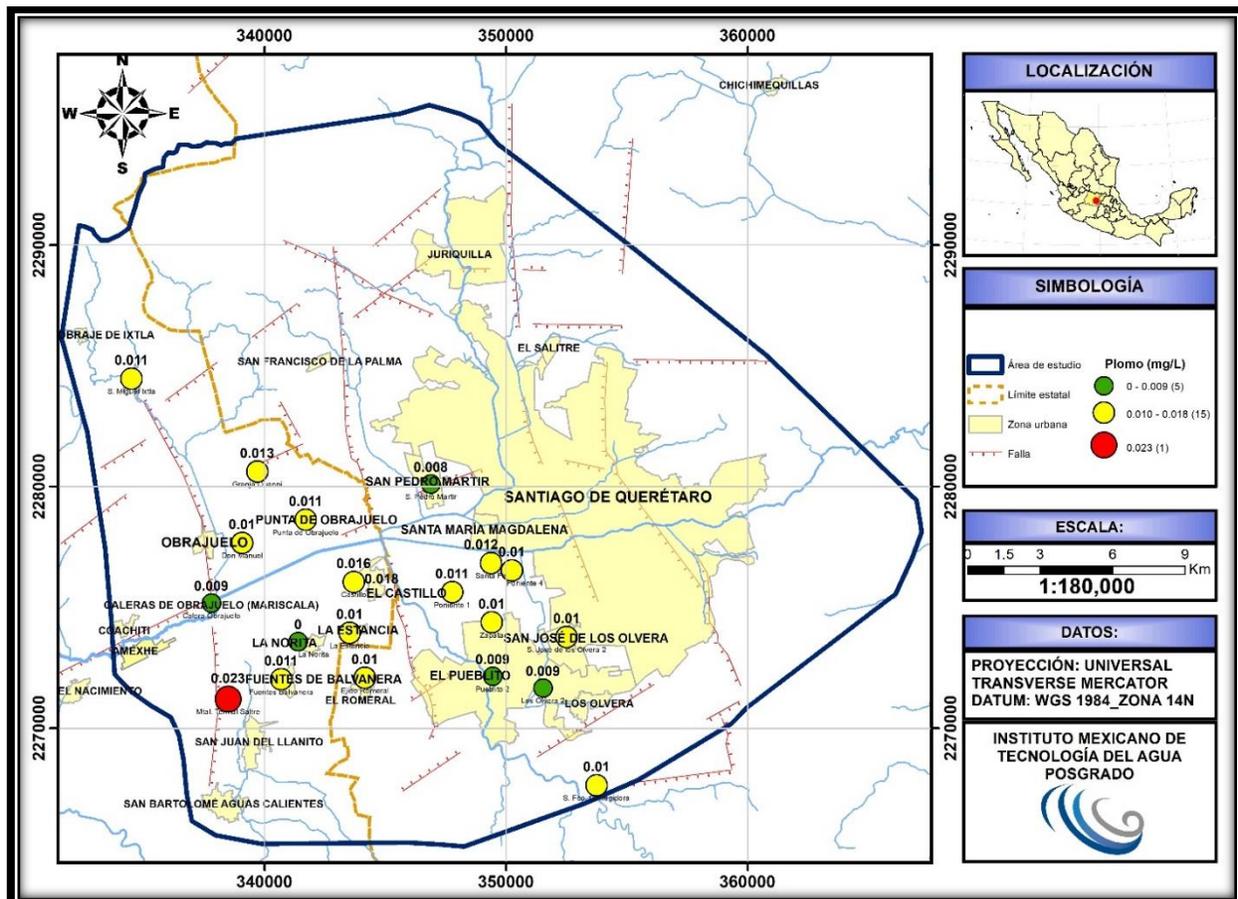


Figura 98. Mapa de la variación espacial de los datos de plomo obtenidos de los pozos muestreados (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales de INEGI, 2010 a y b).

5.8 Análisis estadístico multivariado

5.8.1 Análisis de conglomerados, clúster o jerárquico

Para el estudio de las relaciones de las 33 variables, se utilizó el análisis multivariado, mediante la técnica del análisis de conglomerados permitió identificar la similitud entre las muestras del agua subterránea de acuerdo a sus características fisicoquímicas e hidrogeoquímicas. Para ello, se utilizó el software InfoStat y el método de Ward con la distancia euclídea cuadrada para determinar los agrupamientos de las muestras de acuerdo a Güler *et al.*, 2002.

Se analizaron 21 muestras de agua (19 pozos y un manantial termal), tomando en cuenta un total de 33 variables (temperatura, CE, pH, Potencial Redox, OD, SDT, dureza, Al^{3+} , As, B, Ba^{2+} , Be^{2+} , Ca^{2+} , Cd^{2+} , Cl, Cu^{2+} , F, Fe, HCO_3^- , K, Li, Mg^{2+} , Mn^{2+} , Na, Ni^{2+} , NO_3^- , Pb^{2+} , S, Si^{4+} , SO_4^{2-} , Sr^{2+} , V, Zn^{2+}). En la Figura 99, se muestra el dendograma, obteniendo como resultado 5 agrupaciones. El criterio de las agrupaciones, para este estudio, se ha establecido la línea fenotípica (línea punteada) a una distancia de vinculación métrica aproximadamente de 30, para crear grupos más homogéneos de acuerdo a las características hidrogeoquímicas de cada muestra.

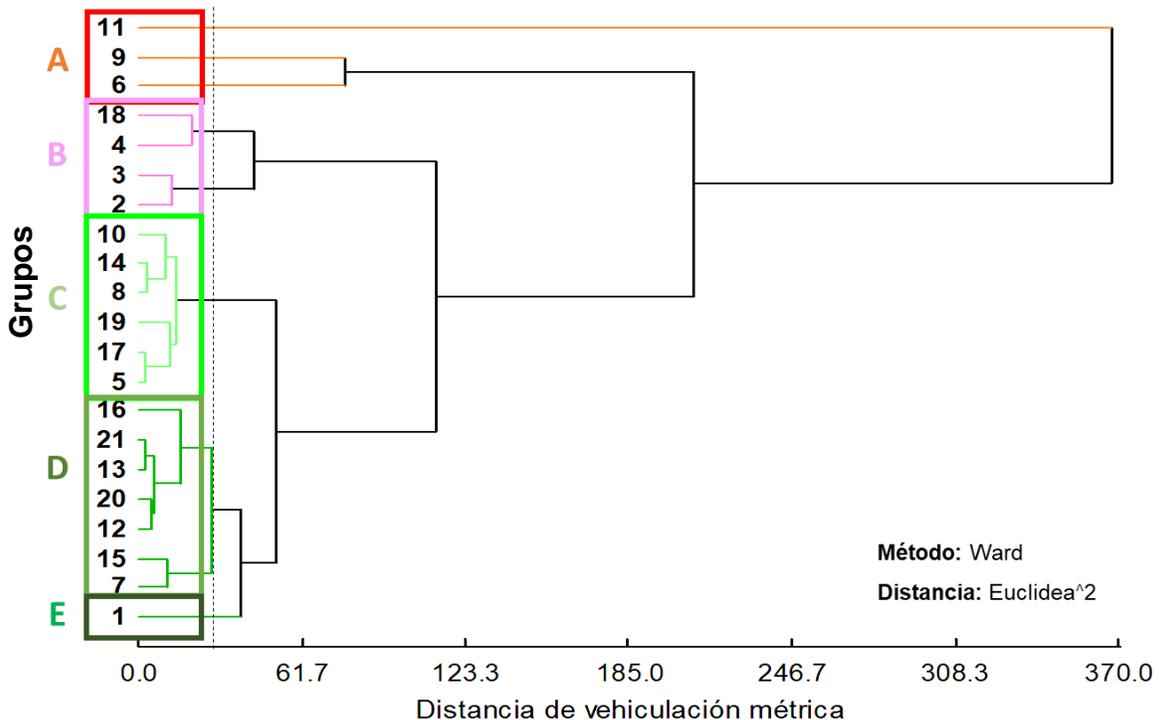


Figura 99. Dendograma de las 21 muestras del agua subterránea del área de estudio.

A continuación, se describen los 5 grupos a partir de la posición de la línea fenotípica que se dividió en el dendograma.

Grupo A: Para el grupo A, se localiza la muestra del manantial termal Salitre, Fuentes Balvanera y La Norita. Se caracterizan por tener temperaturas por arriba de los 40°C hasta los 100°C, valores negativos de Eh (-370 mV y -207 mV) y por lo tanto presentan concentraciones bajas de oxígeno disuelto de 0.8 mg/L a 3.8 mg/L, conductividades por arriba de los 989 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a los 1090 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y tener elementos traza como flúor (1.8 mg/L a 23 mg/L) y plomo (0.11 mg/L a 0.23 mg/L), además de presentar concentraciones considerables de litio, aluminio y sodio. Son aguas bicarbonatadas sódicas (Na-HCO_3^-) y se definen como flujos regionales. El agua del pozo la Norita y Fuentes Balvanera están a una profundidad similar de 95 m y 98 m respectivamente.

Grupo B: Para el grupo B se encuentran ubicadas la muestra del pozo Granja Quanni, el Castillo (150m y 200m) y los Olvera 2. Este grupo se ha caracterizado por tener similitudes en los valores de la conductividad eléctrica, sodio, potasio, hierro, cobre, plomo, manganeso, litio, cadmio, boro y zinc. Son aguas de tipo bicarbonatada sódica (Na-HCO_3^-) y representan flujos intermedios o zonas de mezcla. Los niveles del agua subterránea para el pozo Granja Quanni está en 78 m; el Castillo a 150 m y 200 m; y los Olvera 2 a 146 m.

Grupo C: El grupo C está representado por 6 pozos: Don Manuel, Punta de Obrajuelo, San Pedro Mártir, La Estancia, San José de los Olvera 2 y San Francisco Corregidora. Este grupo está caracterizado por presentar similitudes en los siguientes elementos: dureza, calcio, potasio, magnesio, estroncio, hierro, cobre, plomo y litio. Presentan un agua de tipo bicarbonatada sódica (Na-HCO_3^-) y evidencias de mezcla de aguas. Las profundidades del agua subterránea son de 89, 110, 116, 147, 134 y 50 metros respectivamente.

Grupo D: Para el grupo D se agruparon 7 pozos: Pueblito 2 Garza, Zapata, Poniente 4, Poniente 1, Santa Fe, Ejido Romeral y Calera Obrajuelo. Se distinguen por presentar concentraciones elevadas de dureza, calcio, potasio, magnesio y litio con respecto al grupo C. Presentan concentraciones significativas de nitratos, plomo y zinc.

Son aguas bicarbonatadas cálcicas (Ca-HCO_3^-) y bicarbonatada sódica (Na-HCO_3^-) representando un flujo local e intermedio respectivamente. Las profundidades de los pozos están en 160, 160, 139, 161, 146, 175, y 51 metros respectivamente.

Grupo E: Para este grupo solamente se ubicó la muestra del pozo San Miguel Ixtla, ubicada en la zona noroeste del área de estudio que representa la zona de recarga. Se caracteriza por presentar la máxima concentración en dureza, calcio, magnesio, bicarbonatos y nitratos. Presenta concentraciones mínimas de flúor, litio y valores significativos de estroncio. Es un agua de tipo bicarbonatada cálcica (Ca-HCO_3^-) evidenciando un agua de reciente infiltración o zona de recarga. La profundidad estimada es de 30 m.

El agrupamiento de las muestras con base a su similitud química permitió identificar la distribución espacial de los procesos hidrogeoquímicos. En el mapa de la Figura 100, se muestra la distribución geográfica de los grupos determinados mediante el análisis de conglomerados.

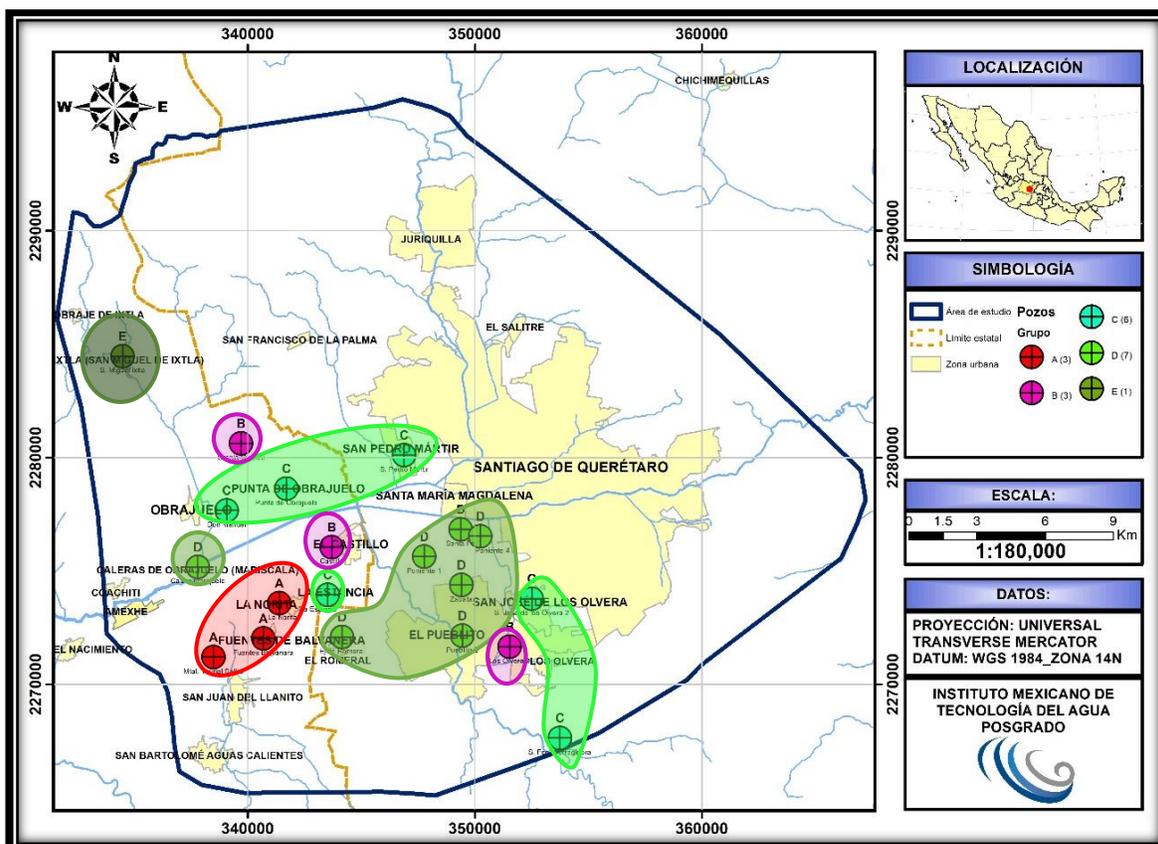


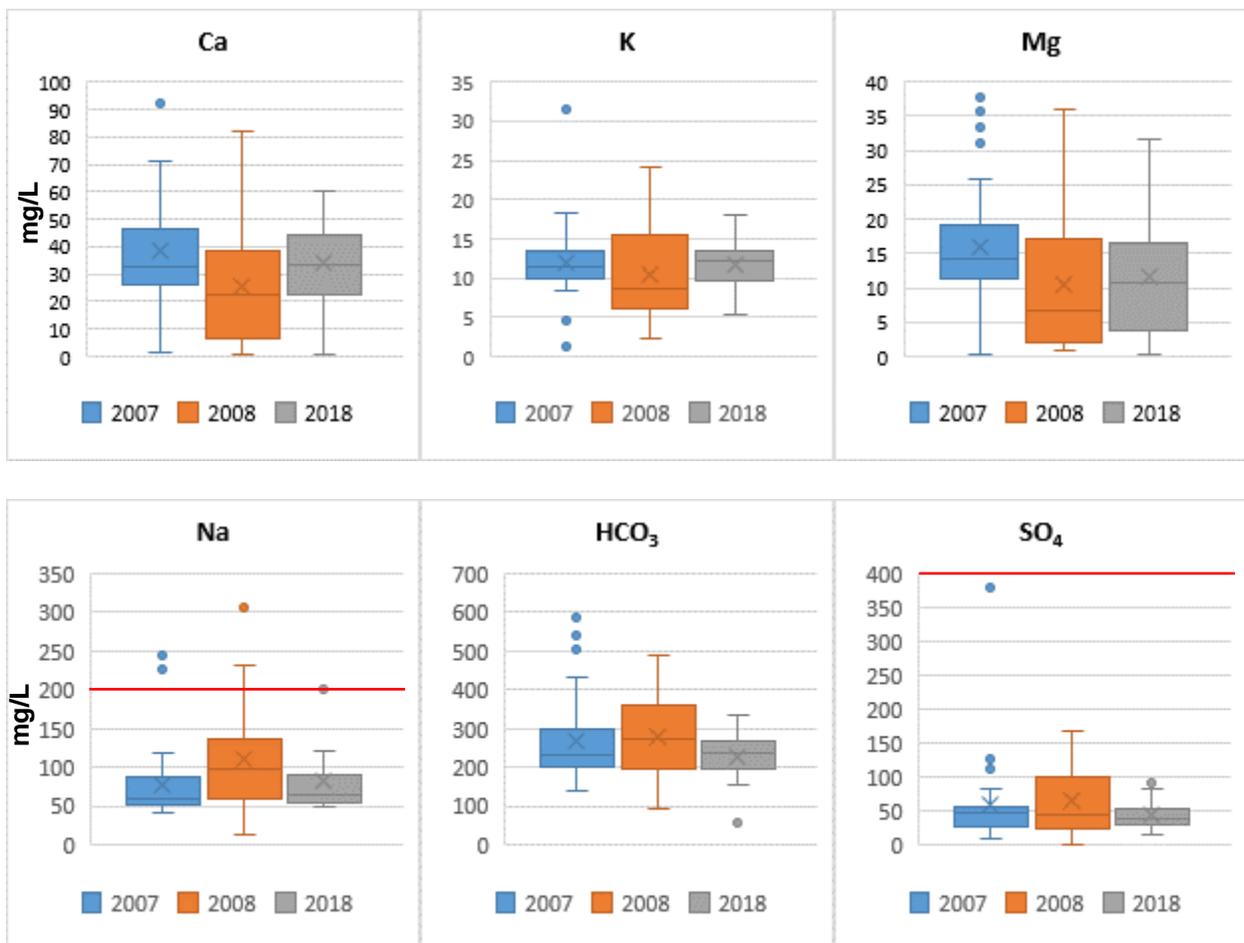
Figura 100. Mapa de la distribución espacial de la clasificación del agua subterránea del área de estudio (Fuente propia: de acuerdo a datos vectoriales INEGI, 2010b).

5.9 Análisis de la variabilidad temporal de la composición hidrogeoquímica del agua subterránea

5.9.1 Elementos mayoritarios

A continuación, se muestran las variaciones en diagramas de cajas y bigotes para todos los elementos mayoritarios de datos recabados de los años 2007 y 2008, comparados con los datos de la presente investigación de 2018.

En la Figura 101, se muestran las variaciones de las concentraciones de los elementos mayoritarios expresados en mg/L.



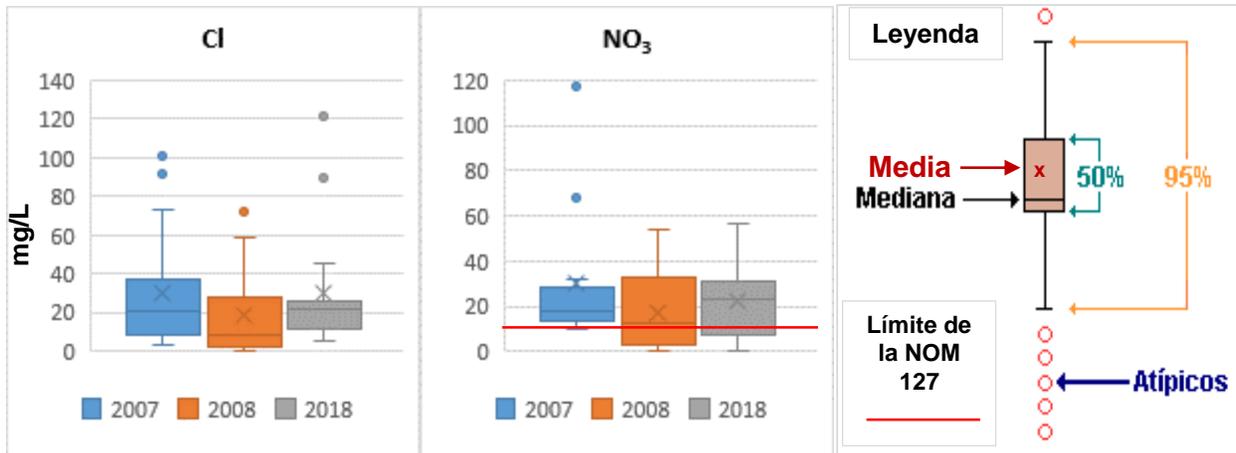


Figura 101. Diagramas de cajas y bigotes de los elementos mayoritarios de los estudios de 2007, 2008 y 2018 (Fuente: elaboración propia con base a datos de Serrano, 2007 y Pérez, 2008).

5.9.2 Elementos minoritarios y traza

En la Figura 102, se analizaron los elementos minoritarios y traza más significativos presentes en el agua subterránea del área de estudio mediante los diagramas de bloxplot para los años 2007, 2008 y 2018. Los parámetros están expresados en mg/L y se compararon con los límites máximos permisibles que establece la norma mexicana NOM-127-SSA1-1994.

Las concentraciones medias de hierro en el acuífero han disminuido, sin embargo, aún presentan valores por arriba de la NOM-127-SSA1-1994. Los valores medios de flúor para los años 2007, 2008 y 2018 se han mantenido por arriba de la NOM-127-SSA1-1994. Las concentraciones de plomo del año 2008 al 2018 han incrementado y rebasando el límite permisible de la NOM-127-SSA1-1994, este aumento de plomo está relacionado con la profundidad del acuífero debido a que mayor profundidad mayor es la concentración de plomo. Los valores de arsénico en el acuífero para el año 2008 estuvieron ligeramente por debajo de la NOM-127-SSA1-1994, sin embargo, en el 2018 el pozo la Norita se encontró un valor de 0.053 mg/L muy por arriba del límite máximo permisible de la NOM-127-SSA1-1994.

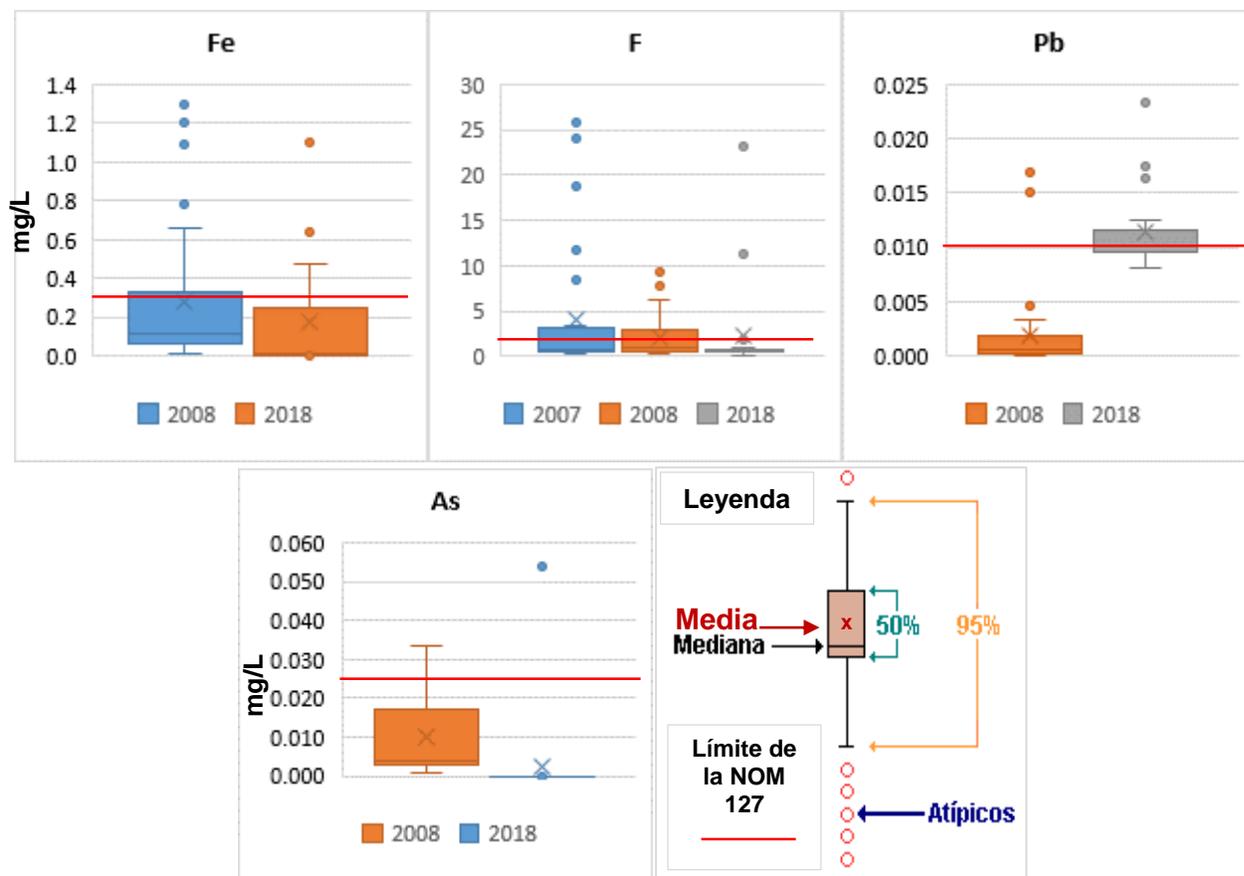


Figura 102. Diagramas de blox-plot de los elementos minoritarios y traza para los años 2007, 2008 y 2018 (Fuente: elaboración propia con base a datos de Serrano, 2007 y Pérez, 2008).

5.10 Análisis de la relación de la profundidad y composición hidrogeoquímica del agua subterránea

En esta apartado se analizó la relación de la profundidad del agua subterránea con los resultados del análisis de conglomerados. En la Figura 103, se muestra la relación de la profundidad de los pozos contra el agrupamiento de las muestras, en el cual, se observaron cuatro grupos (A, B, C y D) que demuestran una íntima relación.

El grupo A, se ubican el pozo la Norita y Fuentes Balvanera con profundidades de 95 y 98 m respectivamente, se caracterizan por tener temperaturas por arriba de los 40°C, conductividades por encima de los 989 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a los 1090 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y tener elementos traza como flúor (1.8 mg/L a 23 mg/L) y plomo (0.11 mg/L a 0.23 mg/L), además de presentar concentraciones considerables de litio, aluminio y sodio. Son aguas bicarbonatadas sódicas (Na-HCO_3^-) y se definen como flujos regionales.

El grupo B, corresponden a la muestra del pozo el Castillo (150m) y los Olvera 2. Este grupo se ha caracterizados por tener similitudes en los valores de la conductividad eléctrica, sodio, potasio, hierro, cobre, plomo, manganeso, litio, cadmio, boro y zinc. Los niveles del agua subterránea están a 150 m y 146 m respectivamente.

El grupo C, se encuentra el pozo Punta Obrajuelo, San Pedro Mártir y San José de lo Olvera 2. Están caracterizados por presentar similitudes en los siguientes elementos: dureza, calcio, potasio, magnesio, estroncio, hierro, cobre, plomo y litio. Presentan un agua de tipo bicarbonatada sódica (Na-HCO₃-), y se encuentran a unas profundidades de 110, 116 y 134 metros respectivamente.

El grupo D, se agrupa el pozo Pueblito 2 Garza, Zapata, Poniente 1 y Ejido Romeral. Se distinguen por presentar concentraciones elevadas de dureza, calcio, potasio, magnesio y litio con respecto al grupo C. Presentan concentraciones significativas de nitratos, plomo y zinc. Las profundidades de los pozos están en 160, 160, 161 y 175 metros respectivamente. Estos pozos se ubican geográficamente en la zona más abatida del área de estudio de acuerdo al mapa piezométrico de la Figura 45.

Aunado a lo anterior, existen una serie de factores que determinan la composición química del agua subterránea, por ejemplo: la distancia entre cada uno de los pozos, la profundidad, la dirección del flujo subterráneo, la distribución espacial de los pozos, tipo de roca, la edad del agua subterránea, entre otras variables ambientales.

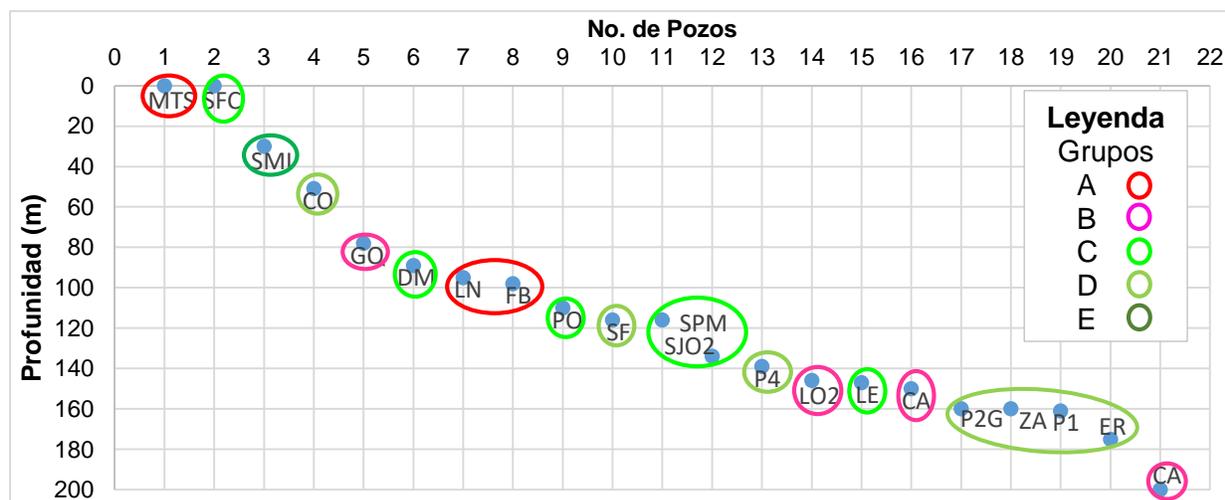


Figura 103. Gráfica de la relación de la profundidad y el análisis de conglomerados.

5.11 Origen de la composición química del agua subterránea

A continuación, se describe los posibles orígenes de los elementos más significativos que determina la composición química de los sistemas de flujos subterráneos, y se dividen de origen natural y antropogénico. Se tomaron en cuenta las características del área de estudio, por ejemplo: tipo de suelo, roca, zonas agrícolas, industriales y urbanas.

En la Tabla 28 y Tabla 29, se muestra el resumen del origen de los componentes o elementos del agua subterránea de acuerdo a las características hidrogeológicas y actividades antropogénicas del área de estudio.

Tabla 28. Elementos de origen natural de acuerdo a las características del área de estudio.

Elementos	Origen
Concentraciones de iones mayoritarios: calcio, potasio, magnesio, sodio, bicarbonatos, sulfatos y cloruros.	Son elementos que se encuentran de manera natural debido a la disolución de rocas y minerales presentes en el área de estudio.
Concentraciones de elementos minoritarios: Boro, Flúor, Hierro y Litio	Las concentraciones significativas de estos elementos presentes en el área de estudio, son evidencias de fuentes hidrotermales provenientes de flujos regionales y profundos y lo confirma la presencia del manantial termal Salitre al suroeste de la zona de estudio.
Concentraciones de elementos traza: Aluminio, arsénico, cadmio y Plomo.	El posible origen de estos elementos trazas están relacionados a flujos regionales de origen hidrotermal provenientes del manantial termal Salitre.

Tabla 29. Elementos que tienen un origen antropogénico de acuerdo a las características del área de estudio.

Elementos	Origen
Concentraciones de ion mayoritario: Nitratos	El nitrato tiene un origen antropogénico, provocado por la intensa actividad agrícola provocado por la utilización de fertilizantes y por la posible infiltración de aguas residuales provenientes de la superficie.

5.12 Análisis Hidrogeológico

A partir de la recopilación y caracterización de la geología, se realizó un mapa geológico-estructural, secciones hidrogeológicas y perfiles litológicos donde se muestra el tipo de roca, profundidad del acuífero y los parámetros hidrogeoquímicos que rebasan los límites permisibles de la NOM-127-SSA1-1994 (Figura 104, Figura 105 y Figura 106, Figura 107 y Figura 108).

El mapa geológico de la Figura 104, predominan rocas volcánicas de diferente composición: andesitas, basaltos, brechas volcánicas y dacitas, se identificaron fallas y fracturas geológicas que determinan los límites y recargas del agua subterránea. Específicamente en la zona suroeste del área de estudio se localiza la falla Obrajuelo con una orientación norte-sur, en ella se emplaza flujos regionales por la posible actividad hidrotermal y por consecuencia está modificando la composición química del pozo Fuentes Balvanera y La Norita.

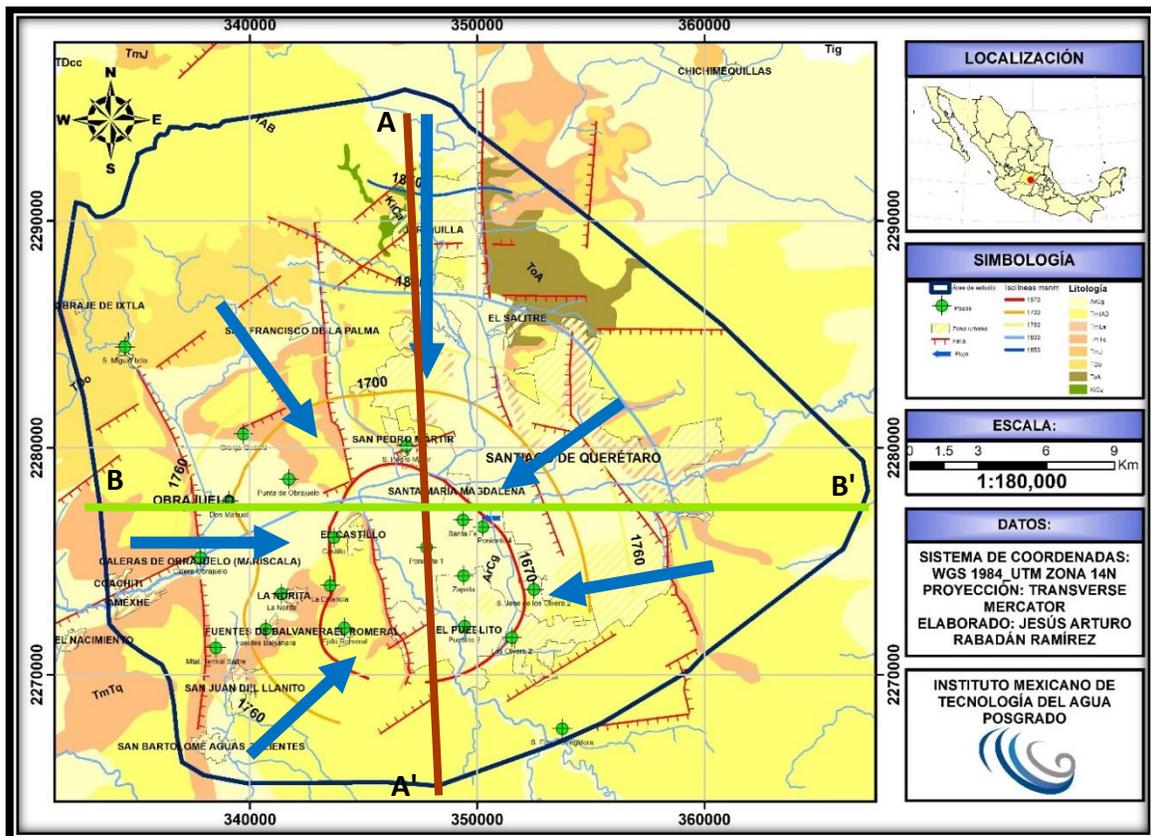


Figura 104. Mapa hidrogeológico (Fuente: elaboración con base a datos de Alaniz-Álvarez et al., 2001 y Consejo de Recursos Minerales, 1999).

En la Figura 105 y Figura 106, se muestran los perfiles litológicos de 17 pozos y un manantial termal, en los cuales, se describe el nivel de profundidad del agua subterránea expresado en metros sobre el nivel del mar (msnm). El acuífero fluye a través de rocas volcánicas (basaltos) y rocas granulares (arenas). En cuanto a la composición química de los pozos tenemos la presencia de 7 parámetros (As, Cd²⁺, F⁻, Fe, Na⁺, NO₃⁻ y Pb²⁺) que sobrepasan los límites permisibles de la NOM-127-SSA1-1994.

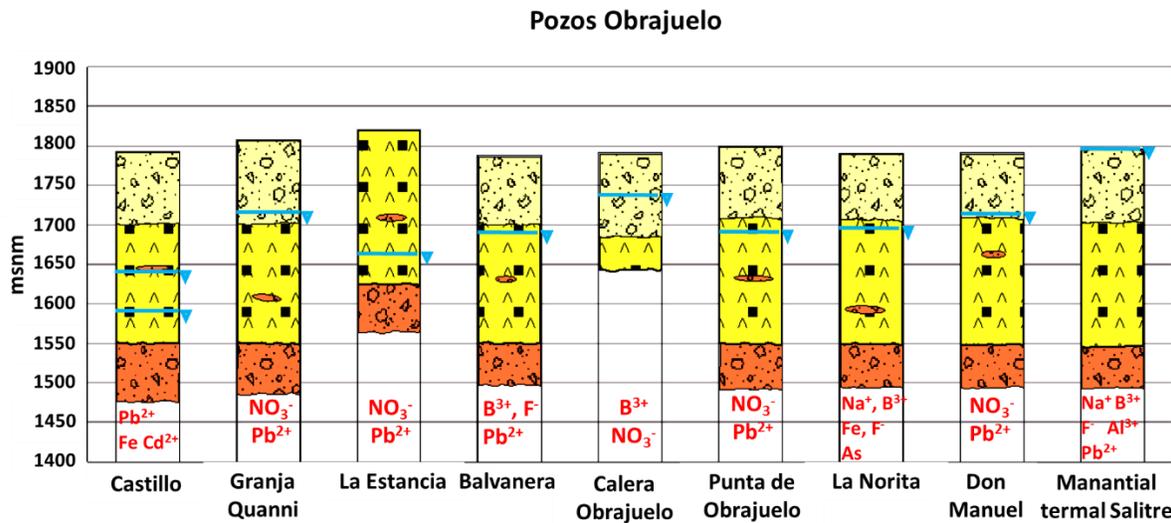


Figura 105. Perfiles litológicos de los pozos de la zona de Obrajuelo (Fuente: elaboración con base a datos de Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001; Carreón *et al.* 2016; Suez-Lesser, 2017; IMTA, 2018).

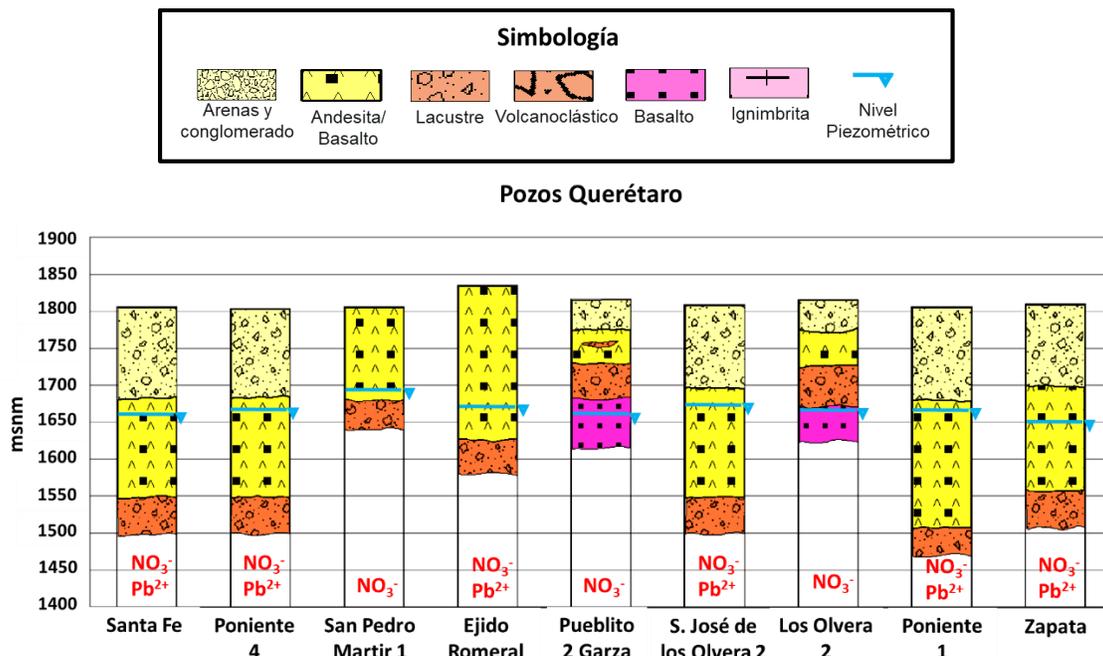


Figura 106. Perfiles litológicos de los pozos de la zona de Querétaro (Fuente: elaboración con base a datos de Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001; Carreón *et al.* 2016; Suez-Lesser, 2017; IMTA, 2018).

La Figura 107 y Figura 108 se muestran la sección hidrogeológica de norte-sur y oeste-este respectivamente. Se puede observar la dirección del agua subterránea y la zona de abatimiento. La estratigrafía está compuesta principalmente por rocas volcánicas, secuencias vulcanoclásticas, derrames andesíticos y basálticos.

En la sección geológica de oeste a este se localiza la falla Obrajuelo, en ella ascienden flujos regionales que modifican la composición química de los flujos locales e intermedios.

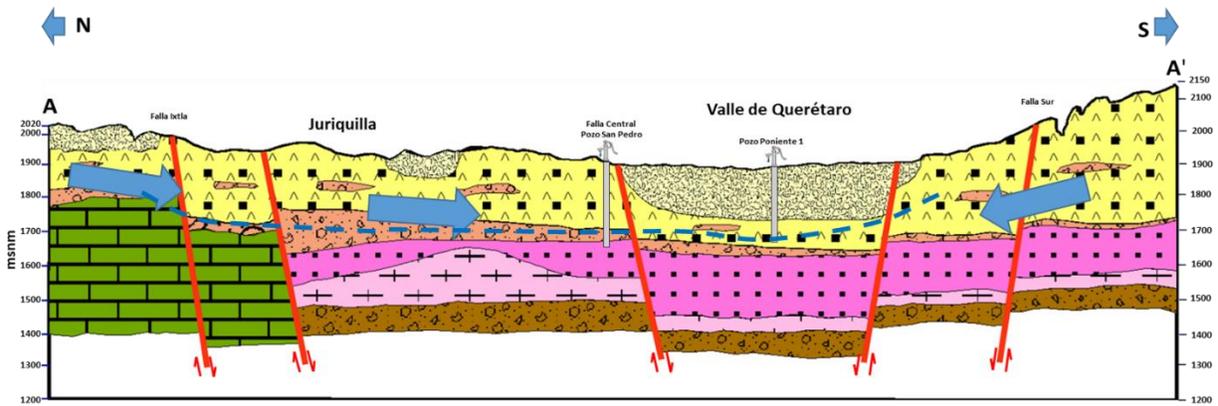


Figura 107. Sección hidrogeológica de norte a sur, integrando datos piezométricos y dirección del flujo (Fuente: elaboración con base a datos de Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001; Carreón *et al.* 2016; Suez-Lesser, 2017; IMTA, 2018).

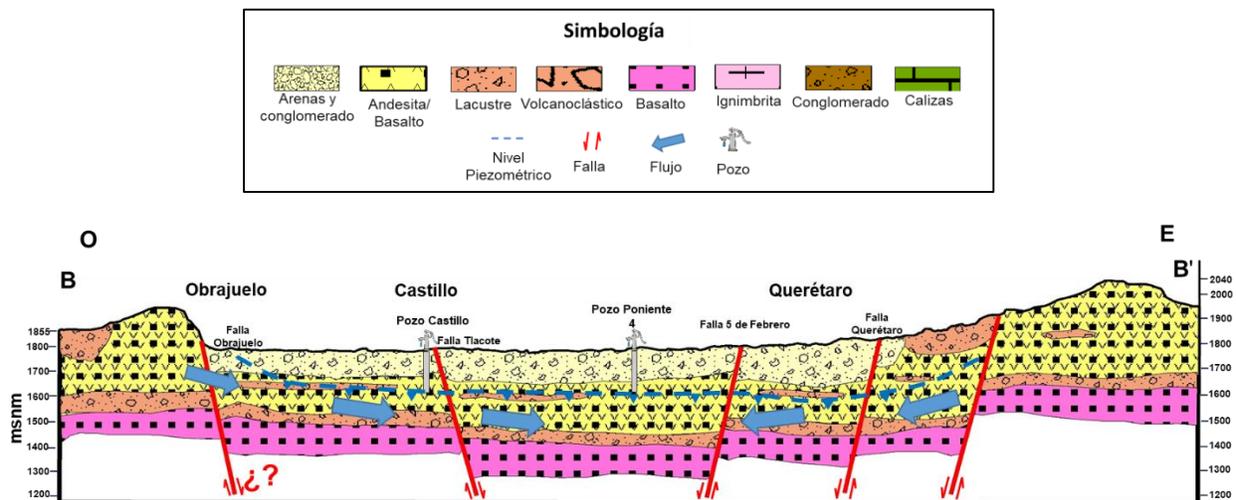


Figura 108. Sección geológica de oeste a este, integrando datos piezométricos y dirección del flujo (Fuente: elaboración con base a datos de Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001; Carreón *et al.* 2016; Suez-Lesser, 2017; IMTA, 2018).

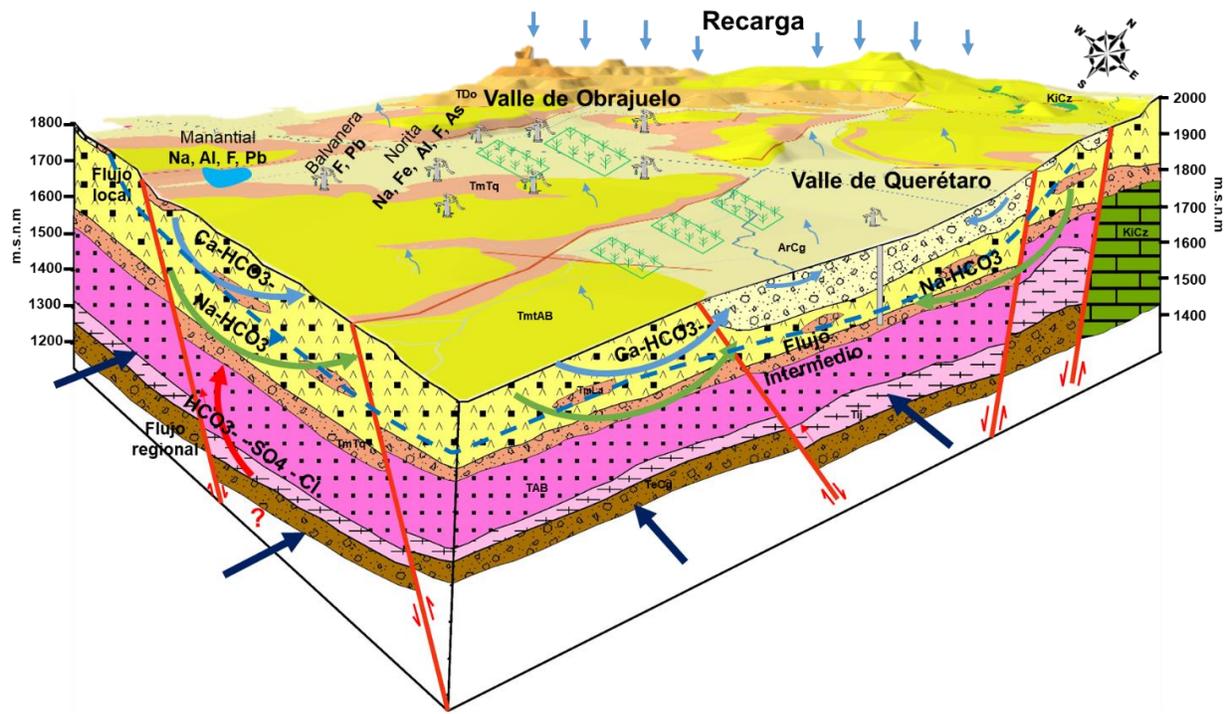
5.13 Modelo Hidrogeológico conceptual

De acuerdo a los resultados y análisis de los datos presentados anteriormente, se integraron las características hidrogeoquímicas e hidrogeológicas para establecer el modelo hidrogeológico conceptual (Figura 109). En el modelo hidrogeológico se observa la distribución de los sistemas de flujos subterráneos: local, intermedio y regional que se describen a continuación.

El sistema de flujo local, se encuentra a corta distancia de la zona de recarga, el nivel del agua tiene una profundidad somera, altos contenidos de oxígeno disuelto por arriba de los 3 mg/L, valores positivos de Eh y temperaturas cercanas a las del ambiente.

El sistema de flujo intermedio se caracterizó por tener mayores concentraciones de sólidos disueltos totales (SDT), menor contenido de oxígeno disuelto y valores menores de Eh con respecto a los flujos locales. En estos flujos se lleva a cabo procesos de disolución de minerales cálcicos y procesos de intercambio iónico debido al intercambio catiónico del material arcilloso ($\text{Arcilla-Na} + \text{Ca} = \text{Arcilla-Ca} + \text{Na}$).

El sistema de flujo regional, se ha definido por la circulación de flujos profundos. Las características fisicoquímicas del flujo regional representan un alto contenido de sales, bajo contenido de oxígeno disuelto (menor a 1), agua alcalina con un pH mayor a 7 unidades, Eh negativos y elevadas temperaturas. Particularmente estos flujos presentan concentraciones significativas de aluminio, cadmio, boro, flúor, litio y plomo, son elementos propios de ambientes geotermales y se confirma que las aguas del manantial termal Salitre están interactuando con los flujos locales e intermedios del área de estudio. Los flujos regionales modifican la composición química de los pozos la Norita y Balvanera ya que también presentan altas conductividades eléctricas y sólidos disueltos totales, como lo demuestra el análisis de conglomerado.



Simbología

- | | | |
|---------------------------------------|--------------------|--------------------|
| Pozos | Entradas | Salidas |
| Ríos | Recargas | Evapotranspiración |
| Profundidad del nivel estático (2017) | Dirección de flujo | |
| Estructuras | Flujo Local | Flujo Intermedio |
| Fallas y fracturas | | Flujo Regional |

Litología

- | | | | | | | | |
|-----------------------|------------------|----------|-----------------|---------|------------|--------------|---------|
| Arenas y conglomerado | Andesita/Basalto | Lacustre | Volcanoclástico | Basalto | Ignimbrita | Conglomerado | Calizas |
|-----------------------|------------------|----------|-----------------|---------|------------|--------------|---------|

Figura 109. Modelo hidrogeológico del acuífero del Valle de Obrajuelo-Querétaro. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

5.14 Discusiones

A partir de los resultados obtenidos con base en la integración de datos geológicos, hidrodinámicos e hidrogeoquímicos, con el objetivo de determinar el comportamiento de los sistemas de flujo subterráneos de la zona de Obrajuelo-Querétaro, es necesario discutir algunos aspectos de gran importancia respecto a las variables analizadas, relacionados a la evaluación hidrogeológica y son las siguientes:

De acuerdo a las características geológicas, el área de estudio se encuentra localizada entre las provincias de la Mesa Central y la Faja Volcánica Transmexicana, donde se identificaron dos sistemas de fallas regionales: el sistema de fallas de Querétaro y el Sistema Noreste-Suroeste (NE-SW), dando origen al valle de Obrajuelo y valle de Querétaro. En esta zona, se encuentran dos unidades litológicas: rocas granulares (arenas, conglomerados y volcano-sedimentarios) y rocas volcánicas fracturadas (basaltos y andesitas).

De acuerdo a los resultados obtenidos, las características hidrodinámicas del acuífero presentan profundidades del nivel estático que van de los 43 a los 160 m, con una profundidad media de 120 metros, las máximas profundidades se registraron en los pozos: el Castillo, Ejido Romeral, Poniente 1 y Pueblito 2 Garza. Estos pozos se ubican en las localidades del Castillo en el Estado de Guanajuato; Sta. María Magdalena y el Pueblito en el Estado de Querétaro. Lo que se infiere que la dirección preferencial del flujo subterráneo es de tipo radial, con dirección de flujo hacia el centro del valle de Querétaro. Dicha explotación es inducida por la intensa actividad agrícola, industrial y urbana de la región. La explotación excesiva del recurso hídrico de la zona de estudio, ha provocado un abatimiento de 1 a 4 m/año para el periodo de 1940 al 2003, por lo que se han registrado en los últimos 40 años, valores desde los 70 m a 300 m de profundidad del nivel estático (CEAQ, 2002; Gutiérrez et al., 2002; Carreón et al. 2005; Herrera et al. 2007; Pérez, 2008).

Mediante el análisis de los elementos mayoritarios de 21 muestras de agua, se determinaron dos tipos de familias de agua: bicarbonatada cálcica (Ca-HCO_3^-) y bicarbonatada sódica (Na-HCO_3^-). Lo que se interpreta que la evolución del agua subterránea demuestra una secuencia normal de un flujo de reciente infiltración a un flujo intermedio a regional. Por otro lado, las investigaciones de López (1996), Serrano (2007), Pérez (2008) y Suez-Lesser (2017), determinaron las dos mismas familias de aguas; bicarbonatada cálcica y bicarbonatada sódica. Por lo tanto, se deduce que el acuífero permanece con la misma composición hidrogeoquímica, que significa no se han presentado variaciones importantes en la composición mayoritaria del agua subterránea.

Para el análisis del índice de saturación, con base al tipo de rocas, se consideraron cinco minerales presentes en el agua subterránea que corresponde a rocas volcánicas de composición andesítica y basáltica, constituidas por los siguientes minerales: plagioclasas (albita), feldespatos, micas, calcita y fluorita. Se pudo constatar que las plagioclasas (albita) y la fluorita se encuentra en disolución, sin embargo, las muestras de agua de La Norita y el Manantial termal el salitre presentan los feldespatos en disolución. La mica de composición potásica se encuentra en precipitación y para la calcita se encuentra en equilibrio en el acuífero.

Mediante el análisis estadístico de las 21 muestras de agua subterránea, permitió simplificar, agrupar y correlacionar las 33 variables fisicoquímicas e hidrogeoquímicas. Dichos resultados fueron los siguientes: El orden de abundancia de los cationes mayores fue: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ y de los aniones $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$. Para el orden de abundancia para los elementos minoritarios es de boro, flúor, litio, estroncio y hierro. Para las concentraciones de elementos traza, el orden de abundancia es del zinc, cadmio, aluminio, arsénico, cobre, manganeso, bario, níquel, vanadio, plomo y berilio.

En el análisis estadístico bivariado de coeficientes de correlación, se obtuvieron resultados tanto positivos como negativos, los cuales permitieron observar procesos hidrogeoquímicos que ocurren en la interacción agua-roca, procesos de mezclas de aguas, disolución de minerales y observar el aporte de componentes de origen antropogénico, así como la evolución del agua subterránea.

Del análisis estadístico multivariado de los 33 parámetros, se agruparon las 21 muestras de agua, dando como resultado 5 agrupaciones con base a su similitud química. Cada grupo reveló diferentes patrones hidrogeoquímicos que demuestran la heterogeneidad del acuífero.

En lo que respecta a la calidad del agua subterránea, se registraron 9 parámetros que sobrepasan los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994, que son los siguientes: pH, arsénico, aluminio, cadmio, flúor, hierro, sodio, nitratos y plomo. Para ello, se utilizó el índice de calidad del agua canadiense (CCME-WQI) y se comparó con base a los criterios de la norma NOM-127-SSA1-1994 para uso y consumo humano.

De las 21 muestras de agua analizadas, arrojaron 17 muestras de agua de pozo presentan un índice de calidad del 65-94, lo que indica que están en un rango de buena a regular calidad para el uso y consumo humano, a pesar de indicios de contaminación. Las 4 muestras restantes presentaron un índice de calidad del 45-64, que representa un agua contaminada, esto debido a que el Manantial termal Salitre modifica la calidad del agua de los pozos La Norita, Castillos de 150 y 200 m de profundidad. Los elementos que sobrepasan los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994 son: pH, sodio, hierro, boro, flúor, aluminio, arsénico, plomo y cadmio.

Los parámetros más significativos que determinaron la calidad del agua subterránea se describen a continuación:

La evidencia de nitratos en los pozos de agua es provocada por la intensa actividad agrícola y descargas de aguas residuales que se infiltran a través de fallas, fracturas y del medio poroso de la zona de estudio. Lo que ha generado la contaminación de 15

pozos de agua, estas concentraciones van de los 0.28 mg/L a los 53 mg/L rebasando en algunas muestras de agua, los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994 que establece un límite permisible de 10 mg/L y que modifican la calidad del agua subterránea, sin embargo, se han reportado concentraciones de hasta 117.1 mg/L para el pozo Alameda de cuerdo a Serrano (2007). Para el estudio de Pérez (2008), su registro máximo fue de 148 mg/L, pozo ubicado en la zona metropolitana de Querétaro. Estas concentraciones se atribuyen por la intensa actividad agrícola e infiltración de aguas residuales que ocurren en la zona.

Así mismo, las investigaciones realizadas por Serrano (2007) y Pérez (2008), reportaron concentraciones de flúor por arriba de la norma NOM-127-SSA1-1994, sin embargo, en la presente investigación se encontraron valores que van de los 0.16 mg/L a los 23 mg/L rebasando el límite permisible de 1.5 mg/L provocado por la mezcla de flujos regionales provenientes del manantial termal Salitre.

Las concentraciones de plomo hacia las profundidades del acuífero van en aumento, ya que para el estudio de Pérez (2008), la concentración media de plomo fue de 0.002 mg/L, mientras que para este estudio el valor máximo fue de 0.023 mg/L, rebasando el límite permisible de la norma NOM-127-SSA1-1994 que establece un límite permisible de 0.01 mg/L. Este elemento presenta una correlación positiva con la profundidad del acuífero y con la concentración de cadmio, es decir, a mayor profundidad se encuentre el agua subterránea mayor es la concentración de cadmio. Lo que significa que se extrae agua de flujos profundos con altas concentraciones de metales traza.

De los datos recopilados de los años 2007, 2008 y comparándolos con los datos del 2018, se realizó el análisis de la variabilidad temporal de la composición de los elementos mayoritarios, en el cual, dio como resultado poca variabilidad en las medias de las concentraciones de calcio, potasio, magnesio, sodio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros y nitratos. Es decir, la composición mayoritaria del agua subterránea se ha mantenido.

Para los elementos minoritarios y traza más significativos presentes en el agua subterránea, se analizaron para los años 2007, 2008 y 2018, que se describen a continuación:

Las concentraciones medias de hierro en el acuífero han disminuido, sin embargo, aún presentan valores por arriba de la NOM-127-SSA1-1994. Los valores medios de flúor para los años 2007, 2008 y 2018 se han mantenido por arriba de la NOM-127-SSA1-1994. Las concentraciones de plomo para el año 2008 al 2018 han incrementado y rebasan el límite permisible de la NOM-127-SSA1-1994, este aumento de plomo está relacionado con la profundidad del acuífero debido a mayor profundidad mayor es la concentración de plomo. Los valores de arsénico en el acuífero para el año 2008 estuvieron ligeramente por debajo de la NOM-127-SSA1-1994, sin embargo, en el 2018 el pozo la Norita se encontró un valor de 0.053 mg/L muy por arriba del límite máximo permisible de la NOM-127-SSA1-1994.

Con base a los resultados obtenidos, se realizó el análisis de la relación de la profundidad del nivel estático contra el análisis de conglomerados. Esta información permitió relacionar que a mayor sea la profundidad del nivel estático se tiene la presencia de elementos como el arsénico, flúor, plomo, manganeso, hierro y cadmio, debido a la extracción de flujos más profundos o regionales.

El grupo A, se ubican el pozo la Norita y Fuentes Balvanera con profundidades de 95 y 98 m respectivamente, se caracterizan por tener temperaturas por arriba de los 40°C, conductividades por encima de los 989 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a los 1090 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y tener elementos traza como flúor (1.8 mg/L a 23 mg/L) y plomo (0.11 mg/L a 0.23 mg/L), además de presentar concentraciones considerables de litio, aluminio y sodio. Son aguas bicarbonatadas sódicas (Na-HCO_3^-) y se definen como flujos regionales.

El grupo B, corresponden a la muestra del pozo el Castillo (150m) y los Olvera 2. Este grupo se ha caracterizados por tener similitudes en los valores de la conductividad eléctrica, sodio, potasio, hierro, cobre, plomo, manganeso, litio, cadmio, boro y zinc. Los niveles del agua subterránea están a 150 m y 146 m respectivamente.

El grupo C, se encuentra el pozo Punta Obrajuelo, San Pedro Mártir y San José de lo Olvera 2. Están caracterizados por presentar similitudes en los siguientes elementos: dureza, calcio, potasio, magnesio, estroncio, hierro, cobre, plomo y litio. Presentan un agua de tipo bicarbonatada sódica (Na-HCO_3^-), y se encuentran a unas profundidades de 110, 116 y 134 metros respectivamente.

El grupo D, se agrupa el pozo Pueblito 2 Garza, Zapata, Poniente 1 y Ejido Romeral. Se distinguen por presentar concentraciones elevadas de dureza, calcio, potasio, magnesio y litio con respecto al grupo C. Presentan concentraciones significativas de nitratos, plomo y zinc. Las profundidades de los pozos están en 160, 160, 161 y 175 metros respectivamente. Estos pozos se ubican geográficamente en la zona más abatida del área de estudio de acuerdo al mapa piezométrico de la Figura 45.

Aunado a lo anterior, existen una serie de factores que determinan la composición química del agua subterránea, por ejemplo: la distancia entre cada uno de los pozos, la profundidad, la dirección del flujo subterráneo, la distribución espacial de los pozos, tipo de roca, la edad del agua subterránea, entre otras variables ambientales.

En cuanto a los posibles orígenes de los elementos más significativos que determinaron las condiciones de los sistemas de flujos subterráneos, se dividieron en origen natural y antropogénico, tomando en cuenta las características del área de estudio: tipo de suelo, roca, zonas agrícolas, industriales y urbanas.

Para los iones mayoritarios: calcio, potasio, magnesio, sodio, bicarbonatos, sulfatos y cloruros; son elementos que se encuentran de manera natural debido a la disolución de rocas y minerales presentes en el área de estudio.

Las concentraciones de los elementos minoritarios: boro, flúor, hierro y litio; son evidencias de fuentes hidrotermales provenientes de flujos regionales y profundos y se confirma con la presencia del manantial termal Salitre al suroeste de la zona de estudio.

Las concentraciones de los elementos traza: Aluminio, arsénico, cadmio y Plomo; son elementos relacionados a flujos regionales de origen hidrotermal provenientes del manantial termal Salitre.

Las concentraciones de nitratos, tienen un origen antropogénico, provocado por la intensa actividad agrícola provocado por la utilización de fertilizantes y por la posible infiltración de aguas residuales provenientes de la superficie.

De acuerdo al análisis hidrogeológico, los sistemas de flujo del agua subterránea se encuentran circulando por dos unidades litológicas: granular (arenas y conglomerados) y volcánicas fracturadas (basaltos y andesitas). El acuífero se define como un acuífero semiconfinado, clasificado como poroso y fracturado. La presencia de fallas, fracturas y discontinuidades estratigráficas, actúan como barreras o zonas de recarga para el sistema de flujo subterráneo. Se determinaron tres tipos de flujos subterráneos: flujo local, flujo intermedio y flujo regional. El primero corresponde a un flujo horizontal de reciente infiltración de un tipo de agua bicarbonatada cálcica (Ca-HCO_3^-): el segundo corresponde a un flujo intermedio que ocurren procesos de disolución de minerales de rocas sódicas, mejor conocido como intercambio iónico y presencia de material arcillosos que dan origen aguas sódicas y se caracteriza por un agua bicarbonatada sódica (Na-HCO_3^-) y el tercero corresponde a un flujo regional caracterizado por una zona de mezcla de flujos hidrotermales, con bajo contenido de oxígeno disuelto, pH alto tendiendo a ser más alcalino, Eh negativo y alta temperatura presentes en la zona del Salitre al suroeste del área de estudio y en aquellas zonas de fallas regionales.

Finalmente se construyó un modelo hidrogeológico conceptual integrando las variables más significativas para la determinación del comportamiento de los sistemas de flujo subterráneo del área de estudio.

Con base a lo anterior, se acepta la hipótesis general de la investigación que consiste que la zona de estudio de Obrajuelo-Querétaro, presenta evidencias de fuentes hidrotermales que modifican la composición de los flujos locales e intermedios. Esto es provocado ya que la zona se encuentra ubicada fisiográficamente en la Faja Volcánica Transmexicana asociada a zonas volcánicas y fuentes hidrotermales activas, por lo que se encontraron concentraciones significativas de aluminio, arsénico, cadmio, flúor y plomo, de un origen natural modifican la calidad los sistemas de flujo subterráneo.

CAPITULO VI.

6. CONCLUSIONES

Con la metodología propuesta, se determinó que el comportamiento de los sistemas de flujo subterráneo del área de Obrajuelo-Querétaro, se caracterizaron tres tipos de flujos: flujo local de composición bicarbonatada cálcica (Ca-HCO_3^-); flujo intermedio y flujo regional de composición bicarbonatada sódica (Na-HCO_3^-). Lo que significa que la evolución del agua subterránea demuestra una secuencia normal de un flujo de reciente infiltración a un flujo intermedio a regional.

La profundidad media del agua subterránea se encuentra a los 120 metros, las máximas profundidades se registraron en los pozos: el Castillo, Ejido Romeral, Poniente 1 y Pueblito 2 Garza. Estos pozos se ubican en las localidades del Castillo en el Estado de Guanajuato; Sta. María Magdalena y el Pueblito en el Estado de Querétaro. Lo que se infiere que la dirección preferencial del flujo subterráneo es de tipo radial, con dirección al centro del valle de Querétaro. Dicha explotación es inducida por la intensa actividad agrícola, industrial y urbana de la región. De acuerdo al análisis hidrogeológico, los sistemas de flujo del agua subterránea se encuentran circulando por dos unidades litológicas: granular (arenas y conglomerados) y volcánicas fracturadas (basaltos y andesitas).

Se determinó la calidad del agua subterránea de los 19 pozos y un manantial termal, mediante el manejo del índice de calidad del agua canadiense (CCME-WQI) y se comparó con base a los criterios de la norma NOM-127-SSA1-1994 para uso y consumo humano. Los resultados demostraron que 17 muestras de agua de pozo presentan un índice de calidad del 65-94, lo que indica que están en un rango de buena a regular calidad para el uso y consumo humano, a pesar de la contaminación de poca magnitud. La evidencia de nitratos en los pozos de agua es provocada por la intensa actividad agrícola y descargas de aguas residuales que se infiltran a través de fallas, fracturas y el medio poroso de la zona de estudio. Lo que ha generado la contaminación de 15 pozos de agua, estas concentraciones van de los 0.28 mg/L a los 53 mg/L rebasando los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994 que establece un límite permisible de 10 mg/L.

Mediante el análisis estadístico permitió simplificar, agrupar y correlacionar las 33 variables fisicoquímicas e hidrogeoquímicas. Dichos resultados ayudaron a definir procesos hidrogeoquímicos que ocurren en la interacción agua-roca, procesos de mezclas de aguas, disolución de minerales y observar el aporte de componentes de origen antropogénico.

Evidentemente el índice de calidad del agua del manantial termal Salitre se encuentra con un valor de 49 (condición contaminada) debido al origen geotermal y a su composición química presentando concentraciones significativas de aluminio, cadmio, flúor y plomo, lo que significa que tiene un aporte de un flujo profundo y regional, afectando a los sistemas de flujo local e intermedios. No obstante, el pozo la Norita, Balvanera y el Castillo se encuentran en las mismas condiciones de contaminación por la influencia de flujos regionales provenientes del manantial termal Salitre que modifica la calidad del agua de los pozos mencionados. Específicamente la calidad del agua del pozo el Castillo se encuentra a una profundidad de 150 y 200 metros, lo que está provocando la extracción de aguas profundas con concentraciones significativas de elementos pesados de aluminio, cobre, plomo, manganeso y cadmio de origen natural.

Mediante los índices hidrogeoquímicos se determinaron procesos de intercambio iónico, debido a que el agua subterránea entra en contacto con material arcilloso de composición sódico y se produce el intercambio del sodio por el calcio ($\text{Arcillas-Na} + \text{Ca} = \text{Arcillas-Ca} + \text{Na}$), es decir, el calcio disuelto en el agua subterránea es retenido por las arcillas y el sodio es intercambiado por el calcio.

Los resultados del cálculo del índice de saturación demuestran que el mineral la albita y la fluorita se encuentran en disolución en el acuífero, mientras que el feldespato potásico y la mica potásica se encuentran precipitadas en el agua subterránea. Para esta investigación, se tomó en cuenta la geología del área de estudio, en este caso se consideraron rocas volcánicas de composición andesítica y basáltica.

Las concentraciones de litio, boro y flúor, son elementos propios de ambientes geotermales que confirman que las aguas del manantial termal Salitre están interactuando con los flujos locales e intermedios del área de estudio.

7. RECOMENDACIONES

Una de las recomendaciones planteadas para este estudio, es que las autoridades correspondientes realicen monitoreos periódicos para vigilar la calidad del agua de los pozos circundantes al manantial termal Salitre.

Realizar un inventario actualizado de todas las descargas puntuales de la zona que comprende del valle de Obrajuelo al valle de Querétaro, en este caso las zonas industriales. Así mismo, verificar que cumplan con la normativa y con sus respectivos tratamientos requeridos.

Para la mitigación de las altas concentraciones de nitratos, se recomienda que las actividades agrícolas establezcan o implementen un sistema de producción sustentable, es decir, cumpliendo con los requisitos de abastecer adecuadamente los alimentos, pero, preservar el potencial de los recursos naturales sin comprometer las potencialidades presentes y futuras del suelo y de las aguas subterráneas. Para ello, es necesario poner en práctica las actividades agroecológicas, que consiste en cultivar la tierra sin la utilización de agroquímicos nitrogenados, sustituyéndolos por fertilizantes agroecológicos.

Para extraer agua de los mantos acuíferos de mejor calidad en el área de estudio, es necesario tomar en cuenta las siguientes recomendaciones: no perforar en zonas de abatimiento (no mayor a 150 m de profundidad); estar a una distancia considerable del manantial termal Salitre y de fallas que tengan una orientación norte-sur por la posible mezcla de flujos regionales.

En cuanto a la investigación científica, se recomienda realizar el modelamiento cuantitativo de los elementos más significativos que controlan el comportamiento de los sistemas de flujo subterráneo, realizar el muestreo antes, durante y después del temporal de lluvias y en épocas de estiaje para tener más exacto el comportamiento hidrogeoquímico del acuífero.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F., Reyes-Zaragoza, M.A., Ojeda-García, A.C., Orozco-Esquivel, M.T., Vasallo, L.F. (2001). Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18 (2), 129-148.
- Amézaga, B.S (2016). *Actualización hidrogeológica del acuífero del Valle de Celaya. Análisis y determinación por concentraciones de Arsénico; propuesta de sitio para la perforación de un pozo de adsorción*. Tesis de Licenciatura en Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Anderson M.P., Woessner W.W. (1992). Applied groundwater modelling simulation of flow and advective transport. Ed. Academic Press, San Diego California.
- Appelo, C. A. J., y Postma, D. (2005). Geochemistry, groundwater and pollution. Second edition. Amsterdam, the Netherlands: A.A. Balkema Publishers.
- Bear, J. y Cheng, A.H.D. (2010). *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport*. Springer.
- Bogomolov (1996). Hydrogeologie et notions de géologie d'ingénieur. Ed de la Paix, Moscú, cap. IV, págs. 205-207.
- Bouwer, Herman. (1978). *Groundwater hidrology*. Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Campa, M.F. (1983). The Tectonostratigraphic Terranes and the Thrust Belt in Mexican Territory. Proceedings of the Circum-pacific Terrane Conference, Stanford University Publications Geological Sciences, 18, 44-46.
- Campos, D. (1998). *Procesos del ciclo Hidrológico*. (3ªed.) México, D.F: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Carreón-Freyre D., Cerca, M., Luna, I. y Gámez, G.F., (2005). Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo del agua subterránea del Valle de Querétaro. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(1), 1- 18.
- Carreón-Freyre D., Cerca, M., Luna, I., Ochoa-González G., Tatini P., Zuñiga F. R. (2016). Shearing along faults and stratigraphic joints controlled by land subsidence in the Valley of Queretaro, Mexico. *Springer*, 24, 657-674. DOI 10.1007/s10040-016-1384-0.
- Carrera-Hernández J, Carreón-Freyre D, Cerca M, Levresse G (2016) Groundwater flow in a transboundary fault-dominated aquifer and the importance of regional modeling: the case of the city of Querétaro, Mexico. *Hydrogeol J*. doi:10.1007/s10040-015-1363-x

- CCME (2001). Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: CCME Water Quality Index 1.0, Technical Report, Canadian Council of Ministers of the environment winnipeg, MB, Canada. [en línea]. <http://www.ccme.ca/sourcetotap/wqi.html>.
- CANADA, DEPARTMENT OF ENVIRONMENT AND CONSERVATION, GOVERNMENT OF NEWFOUNDLAND & LABRADOR (2005). Site Specific Water Quality Index 1.0 calculator [WQI(SS) 1.0]. Consultado el 6 de agosto de 2018 en: [http://www.env.gov.nl.ca/env/waterres/quality/background/wqi\(ss\).xls](http://www.env.gov.nl.ca/env/waterres/quality/background/wqi(ss).xls).
- Centro Queretano de Recursos Naturales (CQRN), (2001). Uso del suelo y vegetación de la zona Sur de Estado de Querétaro. *Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro*. Reporte Técnico.
- Centro Queretano de Recursos Naturales (CQRN), (2003). El sistema de agua en la Región de Querétaro de la Cuenca Lerma-Chapala. *Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro*. Reporte Técnico.
- Cerca-Martínez, L.M. Aguirre-Díaz, G.J., López-Martínez, M., 2000, The geological evolution of the southern Sierra de Guanajuato; a documented example of the transition from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt: *International Geology Review*, 42, 131-151.
- Cervera, L.A. (2007). Indicadores de uso sustentable del agua en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Scientific Electronic Library Online*, 8.
- Comisión Estatal del Agua de Querétaro, Universidad Autónoma de Querétaro (CEAQ; UAQ) (2002). "Estudio Integral del Recurso agua en los acuíferos del estado de Querétaro". Informe 2 Tomos. Reporte Técnico. 553 pág.
- Comisión Estatal del Agua de Querétaro (CEAQ), 2011. Zona Metropolitana de la ciudad de Querétaro (ZMQ), México. Kit de capacitación SWITCH, estudio caso Querétaro (ZMQ), México.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998). México.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2015a). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Celaya (1115), Estado de Guanajuato. *Diario Oficial de la Federación*, 20 de abril, 2015. México.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2015b). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Querétaro (2201), Estado de Querétaro. *Diario Oficial de la Federación*, 20 de abril, 2015. México.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2016). Estadísticas del Agua en México. Edición 2016. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2017). Estadísticas del Agua en México. Edición 2016. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Consejo de Recursos Minerales (CRM), (1999). Monografía Geológico Minera del Estado de Querétaro: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Coordinación General de Minería.
- Córdoba, D.F., Meffe, R., Martínez, V., Segura, M. (2012). Metodología para el desarrollo de un modelo hidrogeológico mediante herramientas de Información Geográficas. Centro de investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH), Chile. Instituto Madrileño de Estudios Avanzados (IMDEA) Agua, España.
- Coughanowr, C. (1991). *Groundwater*. UNESCO. París.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. (1983). *Hidrología subterránea*. (2ª ed.). Barcelona: Omega.
- Custodio, E., y Llamas, M. R. (2001), *Hidrología Subterránea*. (3ª ed.). Barcelona: Omega.
- Deutsch, W.J., (1997). *Groundwater Geochemistry, Fundamentals and Applications to Contamination*. Editores Lewis, 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida.
- Domenico, P. (1972). *Concepts and Models in Groundwater Hydrology*. New York: Mc Graw Hill.
- Escolero, F. O., Gutiérrez, O. C., y Mendoza, C. E. (2017). *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica*. México.
- Evangelista, I. M. (2009). *Metodología Hidroquímica*. [Libro en línea]. Universitat Jaume I. Consultado el 6 de agosto de 2018 en: <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionRH18.pdf>.
- Fagundo, J.R. (2005) *Hidrogeoquímica*. La Habana, Cuba, Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional (CENAMENT).
- Ferrari, L., Garduño, V.H., Innocenti, F., Manetti, P., Pasquarè, G., Vaggelli, G., (1994). A widespread mafic volcanic unit at the base of the Mexican Volcanic Belt between Guadalajara and Queretaro: *Geofísica Internacional*, 33, 107-124.
- Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53 (1), 84-92.
- Ferrari, L. (2004). "Slab detachment control on mafic volcanic pulse and mantle heterogeneity in central México". En: *Geology*, 32 (1), 77-80.
- Fernández A. (2009). *Los hidrogramas y otros sistemas de representación del quimismo de las aguas*. Madrid, España. Grafinat.

- Fetter, C. (1988). *Applied Hydrogeology*. New York: Company Mac Millam Publiling.
- Fetter, C. W. (1993). *Contaminant Hydrogeology*. New York, United States of America. Macmillan Publishing Company.
- Foster S., Lawrence A. y Morris B. (1998). *Las aguas subterráneas en el desarrollo urbano Evaluación de las necesidades de gestión y formulación de estrategias*. Washington, D.C., United State of America: Banco mundial.
- Foster S., Kemper, K., Garduño, H., Nanni, N., y Tuinhof. (2006). *Gestión sustentable del agua subterránea: Amenazas naturales a la calidad del agua subterránea*. Washington, D.C., United State of America: Banco mundial.
- Freeze, A., & Cherry T. A. (1979). *Groundwater*. New Jersey, USA: Prentice - Hall.
- García, E., Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998). Climas, (clasificación de Koppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México.
- Gleik, P., H., Sandra P. L. & Jason M. (1996), *The Sustainable Use of Water in the Lower Colorado River Basin*, The Pacific Institute for Studies in Development, Environment and security, Oakland, California.
- Güler, C., Thyne, G., McCray, J., y Turner, A. (2002). Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*, 10, 455-474.
- Gutiérrez Carrillo, N., Palacios Vélez, E., & Peña Díaz, S., & Palacios Vélez, O. (2002). Escenarios para el aprovechamiento sustentable del acuífero del Valle de Querétaro. *Agrociencia*, 36 (1), 1-10.
- Hem, J.D. (1985). *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*, Alexandria, Virginia, U.S. Geological Survey.
- Herrera-Zamarrón, G., Simuta-Champo, R., Bravo-Jácome, A. 2007, Modelo de flujo del agua subterránea y diseño de red de monitoreo para el acuífero del Valle de Querétaro. Segundo Congreso Nacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (1998). *Estudio hidrológico del estado de Guanajuato*. México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2010a). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Apaseo el Grande, Guanajuato. Clave geoestadística 11005. México.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2010b). Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Querétaro, Querétaro clave geoestadística 22014. México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2016). *Anuario estadístico y geográfico de Querétaro*. México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2015). *Anuario estadístico y geográfico de Guanajuato*. México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2018). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE). Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/descarga/?ti=6>.
- Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1995) Palabras clave: edafología, tipos, suelos, 1:1000000, aspecto, físico, edafología. Fecha de publicación: 10-07-2001
- Leyva S.E. (2010). *Acuíferos semiconfinados y su modelación: aplicaciones al acuífero de la zona metropolitana de la ciudad de México*. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de México. México.
- Libes, S, (2009). *An Introduction to Marine Biogeochemistry*. Second edition.
- López H. A. (1996). Modelo Geológico de un Sistema Hidrotermal no Volcánico: San Bartolomé de Los Baños, Gto., México. *Revista Mexicana de Geoenergía*. 12 (1), 19-32.
- López J. (2017). *Modelo numérico de flujo de agua subterránea para la cuenca de Celaya*. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de México. México.
- Loucks, P. Daniel & John Gladwell S. (1999). *Sustainability Criteria for Water Resource Systems*, International Hydrology Programme, Cambridge University Press.
- Lugo, J. H. (2011). Diccionario geomorfológico. Geografía para el siglo XXI, serie: Textos universitarios, 7 Instituto de Geografía UNAM, México, 480.
- Marrero, L. (1981). *La Tierra y sus recursos*. Madrid, España: Editorial Mediterránea.
- Martínez M. y Mejía M. (2000). Manuales de difusión y divulgación sobre temas selectos de agua subterránea “conceptos básicos de hidrogeología” (proyecto th- 2019). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.
- Mecca J. (2008). *Análisis y modelación del comportamiento hidrológico de las lagunas Don Tomás y bajo Giuliani Santa Rosa, la Pampa*. Tesis de Maestría en Ciencias Hídricas. Universidad Nacional de la Pampa. Argentina.

- Mejía M., Martínez M., González L., Aparicio J.C. y Mañón D.S., 2018. Evidencias isotópicas e hidrogeoquímicas de flujos profundos en el acuífero de Obrajuelo, Guanajuato. XXV Congreso Nacional de Hidráulica. 1-4.
- Melloul, A., Collin, M., (1992). The principal components statistical method as a complementary approach to geochemical methods in water quality factor identification; application to the Coastal Plain aquifer of Israel. *Journal of Hydrology*, 140, 49-73
- Merkel, B. y B. Planer-Friedrich (2005). *Groundwater Geochemistry: A Practical Guide to Modeling of Natural and Contaminated Aquatic Systems*. Springer.
- Mijailov, L. (1985), *Hidrogeología*. Moscú, Rusia. Editorial Mir.
- Nieto-Samaniego A. F., Ferrari L., Alaniz-Álvarez S.A., Labarthe Hernández, G., Rosas-Elguera, J., (1999). Informe de la Carta Geológico-Minera y Geoquímica Hoja Celaya F14C64 escala 1:50000 Estado de Guanajuato. Pachuca, Hidalgo, México: Consejo de Recursos Minerales (Servicio Geológico Mexicano).
- Nieto-Samaniego, A. F., Macías-Romo, C., Alaniz-Álvarez, S.A., (1996). Nuevas edades isotópicas de la cubierta volcánica cenozoica de la parte meridional de la Mesa Central, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13, 117-122.
- Nieto-Samaniego, A. F., (2005). La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 285-318.
- Norma Oficial Mexicana (NOM), 2000, Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización: México, Secretaría de Salud, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 22 de noviembre de 2000.
- Organización Mundial de la Salud (OMS), 2008. Consultado el 6 de mayo del 2018 en http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/es/.
- Ortega, F., Mitre, L.M., Roldán, J., Aranda, J.J., Morán, D., Alaniz, S.A. y Nieto, A.F. (1992). "Carta Geológica de la República Mexicana Escala 1: 2.000.000". Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, Instituto de Geología y Secretaría de Energía, Minas e Industria. 1 Mapa con texto explicativo, 74.
- Ortega-Guerrero M. A. (2009). Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(1), 143-161.

- Paces, J.B., Ludwig, K.R., Peterman, Z.E., Neymark, L.A., (2002). 234U/238U evidence for local recharge and patterns of groundwater flow in the vicinity of Yucca Mountain, Nevada, USA. *Applied Geochemistry*, 17, 751-779.
- Pacheco-Martínez, J., (2007). Análisis de multicapa de la subsidencia en el valle de Querétaro, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24 (38), 389-402.
- Peñuela- Arévalo, L. A. (2007), *Proceso de recarga-descarga de agua subterránea en zonas receptoras de pago por servicio Ambiental Hidrológico, Sierras Nevada y las Cruces-México*. Tesis de Maestría en Geografía, UNAM, México.
- Pérez-Venzor, J.A., Aranda-Gómez, J.J., McDowell, F., Solorio Munguía, J.G., (1996). Geología del volcán Palo Huérfano, Guanajuato, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13 (2), 174-183.
- Pérez V., J. (2008). *Caracterización Hidrogeoquímica del Agua Subterránea del Valle de Querétaro para el Estudio de Sistemas de Flujo*. Tesis de Maestría en Ciencia Ambientales. Centro Universitario Santiago de Querétaro, Querétaro. México.
- Pinto R. O. (2009). *Hidroquímica y contaminación*. Madrid: Universidad complutense de Madrid.
- Raisz, E., (1964). *Provincias Fisiográficas de México*.
- Schoeller. H., (1962). *Les eaux souterraines*. Ed. Masson, Paris.
- Serrano J. (2007). Tesis de Licenciatura en Ing. Geólogo. Universidad Autónoma de Guerrero. México.
- Suez-Lesser, CEAQ (2017). Sinopsis de la actualización del estudio hidrogeológico del acuífero del valle de Querétaro. Mexico.
- Shiklomanov. (1993). World fresh water resources, In: Peter HG (ed), *Water in crisis: a guide to the world's fresh water resources*, Oxford University Press, New York.
- Tarbuck, E.J. y Lutgens, F.K., (2005). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la Geología física*. 8ª ed. Pearson Prentice Hall.
- Tóth J, 1962. A theory of groundwater motion in small drainage basins in Central Alberta, Canada. *J. of Geophysical Res.* 67(11), 4375-4387.
- Tóth J, 1999. Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal*. 7, 1-14.
- Tóth, J. (2000), "Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones", *Boletín Geológico y Minero*, 111, (4), 9-26

- Tóth, J. (2009). *Gravitational Systems of Groundwater Flow: Theory, Evaluation, Utilization*. Cambridge University Press.
- Vélez M. (1999). *Hidráulica de Aguas Subterráneas*. (2° ed.) Colombia, Medellín.: Universidad Nacional de Colombia.
- Vidal-Zepeda, R. (1990a), Precipitación media anual (1990-1992) en Precipitación, IV.4.6. Atlas Nacional de México. Vol II. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- Vidal-Zepeda, R. (1990b). Temperatura media anual (1990-1992). Extraído de Temperatura media, IV.4.4. Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- Villón, B. M. (2007). *Drenaje*. Cartago, Costa Rica. Editorial Tecnológica de CR.
- Werner J. (1996). Introducción a la Hidrogeología. Linares, Nuevo León, México. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra.
- World Health Organization (WHO), (2004). Fluoride in drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for drinking-water quality: World Health Organization, 9.

9. ANEXOS

No	Pozo	ID	Índice de saturación				
			Albita	Feldespató K	Mica K	Calcita	Fluorita
1	San Miguel Ixtla	SMI	0	0.14	6.34	0.26	-2.78
2	Castillo 150m	CA	0.31	1.63	3.70	-0.89	-2.05
3	Castillo 200m	CA	-0.73	0.50	10.17	-0.58	-1.87
4	Granja Quanni	GQ	-1.16	-0.19	5.13	0.02	-2.01
5	La Estancia	LE	-1.27	0.40	5.96	0.07	-1.90
6	Fuentes Balvanara	FB	-1.08	0.34	6.07	0.15	-0.83
7	Calera Obrajuelo	CO	-1.38	0.00	5.73	-0.07	-1.58
8	Punta de Obrajuelo	PO	-1.34	0.23	6.26	-0.05	-2.15
9	La Norita	LN	-2.03	-0.98	5.17	-0.62	0.17
10	Don Manuel	DM	-1.01	0.55	6.79	0.23	-2.30
11	Manantial termal Salitre	MTS	-2.04	-1.63	0.24	-0.04	-0.89
12	Santa Fe	SF	-0.93	0.58	6.98	0.15	-1.50
13	Poniente 4	P4	-0.75	0.82	7.36	0.20	-1.75
14	San Pedro Mártir 1-BIS	SPM	-1.15	0.40	7.00	0.00	-2.14
15	Ejido Romeral	ER	-1.07	0.50	6.15	0.36	-1.69
16	Pueblito 2 Garza	P2G	-1.21	0.54	6.19	0.45	-2.49
17	San José de los Olvera 2	SJO2	-1.50	0.09	5.28	0.02	-1.89
18	Los Olvera 2	LO2	-1.53	-0.68	4.08	-0.49	-2.36
19	San Francisco Corregidora	SFC	-1.12	0.60	6.03	0.47	-2.54
20	Poniente 1	P1	-1.43	0.16	5.29	0.31	-1.86
21	Zapata	ZA	-1.32	0.31	5.49	0.32	-1.78