



**COORDINACIÓN DE DESARROLLO
PROFESIONAL E INSTITUCIONAL**

SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO

T E S I S

**IMPACTOS EN LA CALIDAD DEL AGUA QUE ABASTECE A LA
CIUDAD DE PUEBLA POR EFECTO DE LA EXPLOTACIÓN DEL
ACUÍFERO**

que para obtener el grado de

**Maestro en
Ciencias y Tecnología del Agua**

presenta

Ariadna Ocampo Astudillo

**Tutor: Dra. Sofía Esperanza Garrido Hoyos
Cotutor: Dra. Edith Rosalba Salcedo Sánchez**

Jiutepec, Morelos

2017

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 “IMPACTOS EN LA CALIDAD DEL AGUA QUE ABASTECE A LA CIUDAD DE PUEBLA POR EFECTO DE LA EXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO”, 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.

Ariadna Ocampo Astudillo

Jiutepec, Morelos a 14 de julio del 2017

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua por la oportunidad que me brindó de ser parte de la comunidad de Posgrado, por las enseñanzas que me han hecho crecer profesional y personalmente.

Agradezco a la subcoordinación del posgrado IMTA por la beca otorgada, a todo el personal docente y administrativo que estuvo relacionado con la culminación de mis estudios y en especial al comité tutorial:

Dra. Sofía Esperanza Garrido Hoyos

Dra. Edith Rosalba Salcedo Sánchez

Dr. Manuel Martínez Morales

Dr. Ariosto Aguilar Chávez

Dra. María Vicenta Esteller Alberich

Mi más sincero agradecimiento a las doctoras Edith Rosalba Salcedo Sánchez y Sofía Esperanza Garrido Hoyos por aceptarme para colaborar en su grupo de trabajo, por compartir sus conocimientos, así como la orientación, el apoyo constante durante el proceso de mi formación como maestra y la confianza que me brindaron desde el comienzo.

Expreso mi agradecimiento a la empresa Concesiones Integrales Agua de Puebla por las facilidades otorgadas en el muestreo realizado en los pozos de abastecimiento de la ciudad de Puebla.

DEDICATORIA

A Dios porque ha estado conmigo en cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza.

Dedico el presente trabajo a mis padres por el amor incondicional que me han brindado, por el apoyo que me otorgan en todas mis decisiones y confiar en mí. Les agradezco por los consejos y valores que me han dado y me han llevado a culminar esta etapa de mi vida

A mi hermano por ser un gran compañero de vida.

A Joshua por su continuo apoyo, amor y comprensión.

Ariadna Ocampo Astudillo

Contenido

I. INTRODUCCIÓN	1
II. ZONA DE ESTUDIO	3
II.1 Antecedentes de la zona de estudio.....	3
II.2 Descripción de la zona de estudio.....	5
II.2.1 Generalidades.....	6
II.2.2 Fisiografía.....	9
II.2.3 Geomorfología.....	10
II.2.4 Geología.....	10
II.2.5 Uso de suelo y cobertura vegetal.....	15
II.2.6 Hidrología superficial.....	16
II.2.7 Hidrogeología.....	17
II.2.7.1 Niveles acuíferos.....	17
II.2.7.2 Flujo del agua subterránea.....	19
II.2.7.3 Balance de agua subterránea.....	20
II.2.7.4 Usos del agua en la zona urbana de la ciudad de Puebla.....	21
II.2.7.5 Distribución y cobertura del agua de pozos para abastecimiento público urbano en la Ciudad de Puebla.....	22
II.2.8 Medio socioeconómico.....	25
II.2.8.1 Demografía.....	25
II.2.8.2 Actividades económicas.....	26
III. MARCO TEÓRICO	29
III.1 Hidrología.....	29
III.2 Agua subterránea.....	29
III.3 Tipos de acuíferos.....	29
III.3.1 Acuífero libre.....	30
III.3.1 Acuífero confinado.....	30
III.3.2 Acuífero semiconfinado.....	30
III.3.3 Acuitardo.....	31
III.4 Hidrogeoquímica.....	31
III.4.1 Composición química del agua subterránea.....	31
III.4.2 Procesos químicos en el agua subterránea.....	32

III.4.2.1	Intercambio iónico	32
III.4.2.2	Hidrólisis	33
III.4.2.3	Oxido reducción.....	33
III.4.2.4	Disolución mineral	34
III.4.2.5	Adquisición de sales.....	35
III.4.3	Simulación hidrogeoquímica.....	36
III.4.4	Índice de saturación	38
III.4.5	Representación gráfica de la composición química de las aguas subterráneas	38
III.4.5.1	Representación mediante sistemas de tipo geoestadístico y SIG.	41
III.5	Análisis estadístico multivariado: Cluster ó Análisis de Conglomerados	41
IV.	JUSTIFICACIÓN.....	42
V.	HIPÓTESIS.....	43
VI.	OBJETIVOS.....	43
VI.1	Objetivo General.....	43
VI.2	Objetivos Particulares	43
VII.	MATERIALES Y METODOS.....	44
VII.1	Diagrama de flujo de las actividades	44
VII.2	Búsqueda, análisis y revisión de la información	45
VII.2.1	Procesamiento y análisis de la información	45
VII.3	Estudio piezométrico	45
VII.4	Muestreo y análisis.....	46
VII.4.1	Selección de los pozos de monitoreo 2016.....	46
VII.4.2	Muestreo de pozos de abastecimiento público en la ciudad de Puebla ..	47
VII.5	Estudio Hidrogeoquímico y análisis de los datos históricos.....	49
VII.5.1	Calculo del error.....	49
VII.5.2	Determinación de facies de agua.	50
VII.5.3	Cálculo del índice de saturación.....	50
VII.5.4	Especiación de metales pesados e iones mayoritarios	50
VII.5.5	Análisis estadístico multivariado: Cluster o análisis de conglomerados...	50

VII.6	Estudio de calidad del agua y su variabilidad.....	51
VII.7	Análisis de la composición química del agua con respecto al medio y origen	52
VIII.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53
VIII.1	Búsqueda, análisis y revisión de la información	53
VIII.1.1	Fuentes de información	53
VIII.2	Estudio piezométrico	54
VIII.3	Resultados de los análisis de laboratorio de 2016	57
VIII.4	Estudio Hidrogeoquímico y análisis de los datos históricos.....	61
VIII.4.1	Cálculo del error (datos 2016)	61
VIII.4.2	Determinación de familias de agua y concentraciones de iones mayoritarios	61
VIII.4.3	Diagramas de estabilidad	67
VIII.4.4	Cálculo del índice de saturación.....	69
VIII.4.5	Especiación de iones mayoritarios y metales pesados	72
VIII.5	Resultados del análisis estadístico multivariado: Cluster o Análisis de conglomerados	81
VIII.6	Estudio de la calidad del agua y su variabilidad	86
VIII.6.1	Evaluación de calidad del agua del monitoreo del 22 y 23 de febrero de 2016.....	86
VIII.6.2	Análisis de la variabilidad histórica de calidad del agua	95
VIII.7	Análisis de la composición química del agua con respecto al medio	102
IX.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
X.	BIBLIOGRAFÍA.....	108

INDICE DE FIGURAS

Figura II.1. Localización de la zona de estudio.	6
Figura II.2. Mapa de distribución de climas.	7
Figura II.3. Precipitación media anual en la zona de estudio.	8
Figura II.4. Decreto de veda dentro del acuífero.	9
Figura II.5. Geología del acuífero Valle de Puebla.	11
Figura II.6. Columna estratigráfica del acuífero Valle de Puebla.	12
Figura II.7. Uso de suelo y cobertura vegetal.	16
Figura II.8. Red hidrográfica del acuífero Valle de Puebla.	17
Figura II.9. Sección geológica del acuífero Valle de Puebla.	19
Figura II.10. Dirección del flujo subterráneo del acuífero Valle de Puebla.	20
Figura II.11. Porcentaje del volumen extraído de agua subterránea en cada zona de la ciudad de Puebla.	22
Figura II.12. Zona de cobertura del SOAPAP y Concesiones integrales.	23
Figura II.13. Crecimiento poblacional en la ciudad de Puebla, periodo 1990 – 2015.	26
Figura II.14. Ubicación de las principales zonas industriales en la zona urbana de Puebla.	27
Figura III.1. Representación de un diagrama de piper.	39
Figura III.2. Representación de diagramas de Stiff.	40
Figura III.3. Representación de un diagrama de Schoeller.	40
Figura VII.1 Ubicación de los pozos monitoreados en el mapa de la zona urbana de Puebla.	47
Figura VIII.1. Mapa de isopiezas en la zona urbana de Puebla del año 2002.	54
Figura VIII.2. Mapa de isopiezas en la zona urbana de Puebla del año 2012.	55
Figura VIII.3. Mapa de isodescensos del nivel del agua subterránea (2002 - 2012) en el acuífero Valle de Puebla.	56
Figura VIII.4. Diagrama de Piper con datos del 2013.	63
Figura VIII.5. Diagrama de Piper con datos 2014.	64
Figura VIII.6. Diagrama de Piper con datos 2016.	65
Figura VIII.7. Evolución espacial de la composición química del agua subterránea en la ciudad de Puebla.	67
Figura VIII.8. Diagrama Eh-pH del azufre con datos del 2013 y 2016.	68
Figura VIII.9. Diagrama Eh-pH del sistema de carbonatos, datos 2013 y 2016.	69
Figura VIII.10. Índice de saturación de yeso, calcita y dolomita con respecto a la concentración de sulfatos, datos 2013.	70

Figura VIII.11. Índice de saturación de yeso, calcita y dolomita con respecto a la concentración de sulfatos, datos 2016.	70
Figura VIII.12. Rango de porcentaje de las especies del carbono.	73
Figura VIII.13. Diagrama de la fracción molar de las especies del carbono.	73
Figura VIII.14. Rango del porcentaje de las especies del azufre.	74
Figura VIII.15. Diagrama de la fracción molar de las especies del azufre.	74
Figura VIII.16. Rango del porcentaje de las especies del calcio.	75
Figura VIII.17. Rango del porcentaje de las especies del magnesio.	75
Figura VIII.18. Diagrama de la fracción molar de las especies del calcio.	76
Figura VIII.19. Diagrama de la fracción molar de las especies del magnesio.	76
Figura VIII.20. Rango del porcentaje de las especies del boro.	77
Figura VIII.21. Diagrama de las fracción molar de las especies del boro.	78
Figura VIII.22. Rango del porcentaje de las especies del plomo.	79
Figura VIII.23. Diagrama de la fracción molar de las especies del plomo.	79
Figura VIII.24. Rango del porcentaje de las especies del manganeso.	80
Figura VIII.25. Diagrama de la fracción molar de las especies del manganeso.	81
Figura VIII.26. Dendrograma del análisis de Cluster.	82
Figura VIII.27. Distribución espacial de las familias de Cluster.	83
Figura VIII.28. Mapa de evaluación de calidad del agua con los criterios de la OMS para Ca^{2+} en la ciudad de Puebla.	88
Figura VIII.29. Mapa de evaluación de calidad del agua con los criterios de la OMS para Mg^{2+} en la ciudad de Puebla.	89
Figura VIII.30. Mapa de evaluación de calidad del agua con los criterios de la NOM para SO_4^{2-} en la ciudad de Puebla.	90
Figura VIII.31. Mapa de evaluación de calidad del agua con los criterios de la OMS para SO_4^{2-} en la ciudad de Puebla.	90
Figura VIII.32. Mapa de evaluación de calidad del agua con los criterios de la NOM para Pb total en la ciudad de Puebla.	91
Figura VIII.33. Mapa de evaluación de calidad del agua con los criterios de la OMS para Pb total en la ciudad de Puebla.	92
Figura VIII.34. Mapa de evaluación de calidad del agua con los criterios de la NOM para Mn total en la ciudad de Puebla.	92
Figura VIII.35. Mapa de evaluación de calidad del agua con los criterios de la OMS para Mn total en la ciudad de Puebla.	93

Figura VIII.36. Mapa de evaluación de calidad del agua con los criterios de la OMS para B total en la ciudad de Puebla.....	93
Figura VIII.37. Diagrama de cajas y bigotes para pH.	95
Figura VIII.38. Diagrama de cajas y bigotes para SDT.....	96
Figura VIII.39. Diagrama de cajas y bigotes para calcio.....	97
Figura VIII.40. Diagrama de cajas y bigotes para magnesio.	98
Figura VIII.41. Diagrama de cajas y bigotes para sodio.	98
Figura VIII.42. Diagrama de cajas y bigotes para bicarbonatos.	99
Figura VIII.43. Diagrama de cajas y bigotes para sulfatos.	100
Figura VIII.44. Diagrama de cajas y bigotes para cloruros.	101
Figura VIII.45. Diagrama de cajas y bigotes para nitratos.	102
Figura VIII.46. Mapa de la distribución espacial de los tipos de agua en la zona urbana de Puebla.	103

INDICE DE TABLAS

Tabla II.1. Balance de agua subterránea en el acuífero Valle de Puebla.	21
Tabla II.2. Descripción de la distribución del agua de los 20 pozos utilizados para el muestreo de calidad del agua.....	24
Tabla II.3. Giros industriales y empresas más importantes de la ciudad de Puebla.....	27
Tabla VII.1. Ubicación de los pozos muestreados.	46
Tabla VII.2. Parámetros fisicoquímicos evaluados en el monitoreo de pozos 2016.	48
Tabla VIII.1. Fuentes de información de los datos fisicoquímicos obtenidos en el año 2011, 2013, 2014 y 2016.	53
Tabla VIII.2. Resultados fisicoquímicos de parámetros de campo y análisis de laboratorio, 2016.	57
Tabla VIII.3. Resultados del análisis de laboratorio de iones mayoritarios, datos 2016	58
Tabla VIII.4. Resultados del análisis del laboratorio de elementos traza e iones minoritarios (parte 1), 2016.....	59
Tabla VIII.5. Resultados del análisis del laboratorio de elementos traza e iones minoritarios (parte 2), 2016.....	60
Tabla VIII.6. Resultados del porcentaje de error del balance iónico de los pozos muestreados el 22 y 23 de febrero del 2016 en la Ciudad de Puebla.....	61
Tabla VIII.7. Nombre de los pozos analizados con su de identificación en los diagramas Eh-pH.	68
Tabla VIII.8. Valores promedio de iones mayoritarios de los grupos de Cluster.....	83
Tabla VIII.9 Valores promedio de iones minoritarios de los grupos de Cluster.....	84
Tabla VIII.10. Evaluación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos con respecto a los criterios de calidad del agua (datos 2016).....	86
Tabla VIII.11. Evaluación de los iones mayoritarios con respecto a los criterios de calidad del agua (datos 2016).	87
Tabla VIII.12. Evaluación de metales pesados y elementos traza totales con respecto a los criterios de calidad (datos 2016).....	87
Tabla VIII.13. Parámetros significativos en aguas residuales para los principales giros industriales de la ciudad de Puebla.....	105

RESUMEN

En los últimos 30 años, la ciudad de Puebla ha manifestado un importante crecimiento demográfico, convirtiéndose en la cuarta ciudad más poblada del país; esto se debe principalmente al establecimiento de una zona industrial en el norte de Puebla y la ampliación de las vías de comunicación. Dicho crecimiento ha ocasionado una expansión territorial del área metropolitana así como mayor demanda de recursos, principalmente agua, la cual está sujeta a una sola fuente de abastecimiento debido a la alta contaminación de las fuentes superficiales como el río Atoyac, Alseseca y la presa Manuel Ávila Camacho.

El agua subterránea proveniente del acuífero Valle de Puebla constituye la única fuente de abastecimiento de la ciudad de Puebla y municipios conurbados, la extracción intensiva de agua ha ocasionado efectos en el acuífero que se han manifestado en el descenso de niveles piezométricos, baja productividad en algunos pozos, agrietamiento del terreno y cambios en la composición química del agua de abastecimiento principalmente por el aumento de sólidos disueltos totales, dureza total y elementos como calcio, magnesio y sulfatos. Debido a esto, la presente investigación tiene por objeto evaluar los efectos de la explotación actual y los cambios en la calidad del agua subterránea que abastece a la ciudad de Puebla.

El trabajo comprende la recopilación de información histórica de varios estudios realizados anteriormente, el cálculo de la evolución piezométrica, el análisis de datos hidrogeoquímicos que permitió estudiar las propiedades y composición del agua subterránea en relación con la geología regional, así como la identificación de los procesos que influyen en los cambios de estas propiedades. Se llevó a cabo un análisis estadístico para la validación de los resultados hidrogeoquímicos. Posteriormente se aplicó un estudio de la calidad del agua y su variabilidad histórica y finalmente se realizó un análisis de la composición química del agua con respecto al medio, donde se identificaron los impactos en la calidad del agua debido a la explotación intensiva en la zona urbana de la ciudad de Puebla.

Los resultados muestran que existe un abatimiento promedio de 2 m/año, en la zona urbana de la ciudad de Puebla.

Del análisis hidrogeoquímico se identificó una evolución en el quimismo del agua que muestra la migración de agua tipo bicarbonatada cálcica a sulfatada cálcica. Además

se demostró que la química del agua del acuífero profundo en la zona urbana de la ciudad, está definida por el proceso de dedolomitización.

Los resultados asociados a la evaluación de la calidad del agua y el análisis histórico permitieron identificar un aumento significativo en las concentraciones de calcio, magnesio, sulfatos, sólidos disueltos totales y dureza total, así como la presencia de metales pesados. Se detectó por primera vez concentraciones por arriba de los límites recomendados por los criterios para agua de consumo humano de plomo, boro y manganeso, cuyo origen puede atribuirse a procesos de procesos naturales como antropogénicos.

La interpretación de todos los resultados confirmó que los pozos que se ubican en la zona de abatimiento manifiestan un deterioro en la calidad del agua por efecto del gradiente hidráulico que favorece la inducción de agua mineralizada proveniente del acuífero profundo hasta el acuífero superior a través de las fallas y fracturas.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el crecimiento demográfico y el desarrollo industrial de las últimas décadas han aumentado la demanda de los recursos naturales. El agua juega un papel muy importante en el mantenimiento de los ecosistemas y en el desarrollo de las civilizaciones; sin embargo, satisfacer las necesidades de agua continúa siendo un reto para la sociedad debido al crecimiento de la demanda y al deterioro de su calidad (Gárfias *et al.*, 2010; Samboni *et al.*, 2011).

El agua subterránea es una fuente de abastecimiento en muchas áreas urbanas y rurales y en algunos casos la única fuente, por lo tanto es un factor clave en el desarrollo socioeconómico; y debido a que las propiedades físicas de esta agua suelen ser de alta calidad, en muchas ocasiones no es necesario realizar un tratamiento para su potabilización. Asimismo, es aprovechada de manera versátil, se puede extraer en cualquier época del año de cualquier punto de la superficie de un acuífero (Waller y Mendoza, 2009).

La importancia del agua subterránea en México se debe principalmente al volumen que es utilizado por los usuarios. El 38.9% del volumen total concesionado para usos consuntivos (33,311 Hm³ por año al 2015) procede de agua subterránea (CONAGUA, 2016); y cubre el 52% de la asignación del agua en las ciudades donde se concentran 60 millones de habitantes. Además, el agua subterránea contribuye para cubrir el 33% de las concesiones de agua para riego a nivel nacional y satisface gran parte de la demanda industrial (CONAGUA, 2015a).

A partir de los años setenta y debido al desarrollo socioeconómico del país y a la política de aprovechamiento del agua subterránea, se ha incrementado el número de acuíferos sobreexplotados. En el año 1975 se reportaron 32 acuíferos sobreexplotados de un total de 653 (CONAGUA, 2011), para el año 2015 existen 105 acuíferos sobreexplotados de los cuales se extrae el 55% del agua subterránea para todos los usos (CONAGUA, 2016).

El uso del agua subterránea para abastecimiento humano se ve limitado por su calidad y esto determina si es apta o no para ciertos usos. Esta calidad define la necesidad de efectuar tratamientos. El agua subterránea en su estado natural tiene constituyentes minoritarios que pueden estar presentes de forma natural por la geología de las rocas en las que se contiene o por contaminación antropogénica.

Este trabajo se enfoca a la zona urbana de la ciudad de Puebla, ubicada en el estado de Puebla en México, esta ciudad se abastece de agua subterránea proveniente del acuífero Valle de Puebla (Gárfias *et al.*, 2010; Salcedo *et al.*, 2013) y como otros acuíferos del país

ha sido sometida a una explotación intensiva, problemática que ha desencadenado varios efectos perjudiciales en la zona urbana de la ciudad, entre los efectos más notables destacan: el descenso de los niveles del agua subterránea, el agrietamiento del terreno, reducción de la productividad en los pozos y el aumento en constituyentes mayoritarios disueltos en el agua (Flores *et al.*, 2006; Gárfias *et al.*, 2010; Salcedo *et al.*, 2013).

En esta ciudad se asienta el 85% de la industria existente en el estado, con un crecimiento industrial y poblacional del 60% y 56% respectivamente en los últimos 25 años, lo cual ha originado un incremento en la explotación del acuífero (Salcedo *et al.*, 2016). Por lo anterior, este acuífero tiene un papel muy importante en el desarrollo económico y social, y su manejo es importante en la sustentabilidad económica del lugar ya que no existen otras fuentes alternativas de abastecimiento (Arroyo, 2005; Flores *et al.*, 2006; Gárfias *et al.*, 2010; Salcedo *et al.*, 2013). Debido a esto, la presente investigación tiene por objeto evaluar los efectos de la explotación actual y los cambios en la calidad del agua subterránea que abastece a la ciudad de Puebla.

II. ZONA DE ESTUDIO

II.1 Antecedentes de la zona de estudio

El acuífero Valle de Puebla ha sido estudiado por diferentes autores. Jiménez *et al.*, (2005) y Flores *et al.*, (2006), elaboraron un modelo de flujo y transporte para representar la variación espacial y temporal de los parámetros que caracterizan el agua subterránea del valle y la evolución de la explotación del acuífero durante los últimos treinta años. Con este modelo predijeron una disminución adicional del nivel freático de 15 m y un incremento de la intrusión de agua termal sulfhídrica. Su trabajo mostró un aumento en las cantidades de sólidos disueltos totales (SDT) de más de 500 mg/L y obtuvo que la sobreexplotación de los pozos de la ciudad ha impactado negativamente en el balance hidrológico del acuífero, teniendo por consecuencia un descenso en el volumen de agua en manantiales y corrientes superficiales del valle y además un cambio en la calidad del agua dulce del acuífero debido al incremento de agua sulfhídrica ascendente que proviene de áreas hidrogeológicas más profundas.

Arroyo (2005) realizó un estudio de la caracterización de diversos pozos profundos y poco profundos de la ciudad de Puebla; para determinar el origen de la contaminación natural del acuífero Valle de Puebla. De acuerdo a los análisis químicos se identificaron dos tipos de agua: a) agua con iones HCO_3^- , SO_4^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} que corresponde a manantiales, pozos profundos y algunos pozos pocos profundos, b) agua con iones HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} y Mg^{2+} que corresponden a pozos someros. Se encontró que los pozos del primer tipo de agua descargan agua de “flujo regional” que proviene de zonas profundas, es decir que confluye hacia la superficie a través de la falla de Atlixco y fracturas existentes en el acuífero y la del segundo tipo descargan agua de “flujo local” que proviene del acuífero libre. En este trabajo se concluyó que la contaminación natural de sulfatos es debido a la disolución de las rocas evaporitas presentes en la columna geológica.

Gárfias *et al.* (2010) realizaron un estudio para determinar el origen de la mineralización en el agua subterránea de la ciudad de Puebla. En el estudio se determinó que la calidad del agua está afectada en su composición química y el tiempo que permanece en contacto con las rocas. Los resultados de este trabajo mostraron que las concentraciones de sulfato tienden a aumentar debido a la disolución de evaporitas, ubicadas a más de 400 metros de profundidad. También se concluyó que al aumentar la profundidad en el acuífero pueden presentarse procesos de intercambio iónico o dedolomitización que cambian la mineralización de las aguas por el aumento en la concentración iones calcio que varían de 29.2 a 496.9 mg/L, magnesio de 11.4 a 157.7 mg/L y sulfatos que van de 5.6 a 794 mg/L.

En 2010 la empresa Ingeniería y Gestión Hídrica, S. C. en conjunto con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), realizaron la evaluación hidrogeológica, balance hídrico e hidrogeoquímica del acuífero Valle de Puebla. Los resultados de este estudio mostraron que hay una sobreexplotación del acuífero, dado que la recarga total cuantificada fue de 357.6 Hm³/año y la descarga total del sistema acuífero fue de 381.2 Hm³/año, incluye el uso público urbano y descarga en ríos y manantiales y el abatimiento medio ponderado determinado fue de -0.43 m/año (CONAGUA, 2010).

Salcedo (2013), realizó un modelo hidroeconómico de cantidad, calidad y costos, mediante la evaluación de diferentes escenarios de manejo del agua subterránea. Dentro del estudio, realizó la evaluación de calidad del agua de un grupo de pozos que abastecen a la ciudad de Puebla con un índice de calidad denominado CCME-WQI (CCME, 2001) y corroboró el deterioro en la calidad del agua, debido en relación directa al descenso de los niveles piezométricos, además detectó un desplazamiento de agua del acuífero profundo hacia el acuífero superior y que origina una mezcla de agua de ambos acuíferos. Se reportó igual que Arroyo (2005) que la calidad del agua está afectada por SDT, Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁺ y la dureza total.

En el año 2015 la CONAGUA publicó la “Actualización de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Valle de Puebla”, donde mostró la evolución del nivel estático para el periodo 2002-2010 e indicó un abatimiento de 2 a 20 m, los valores anuales de abatimiento son de 0.25 a 2.5 m/año con un promedio de 0.6 m/año. Los mayores abatimientos (15-20 m) se presentan al noroeste de San Martín Texmelucan, de 5 a 10 m en toda el área que rodea al poblado Huejotzingo y en la región comprendida entre la ciudad de Puebla, Cholula, Santa María Coronango y Tlaxcalancingo (CONAGUA, 2015b).

El Diario Oficial de la Federación publicó el 09 de febrero de 2016 el “Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del acuífero Valle de Puebla”. En este decreto se publicó la disponibilidad media anual de agua subterránea con un volumen de 44 millones de metros cúbicos anuales (DOF, 2016).

Salcedo *et al.*, (2016) presentaron la variación espacial y temporal de la calidad del agua en el área urbana del acuífero del Valle de Puebla. En el estudio se mostró un deterioro en la calidad del agua y la cantidad de pozos clasificados con excelente calidad han disminuido un 26.3% desde 1997 hasta el 2013 y los pozos que se consideran de mala calidad han aumentado un 12.62 % para el mismo periodo en toda la zona urbana del acuífero del Valle de Puebla.

En los estudios de calidad del agua subterránea del Valle de Puebla realizados anteriormente no se ha reportado un análisis de los elementos traza y metales pesados. El agua subterránea del acuífero libre puede cambiar su composición química debido a las actividades antropogénicas ya que existen infiltraciones de agua de lluvia o río que pueden introducir componentes químicos como son los metales pesados provenientes de los residuos industriales o desechos urbanos. Para identificar lo anterior surge la importancia de determinar las concentraciones de los elementos traza presentes y evaluar si presentan un riesgo a la salud.

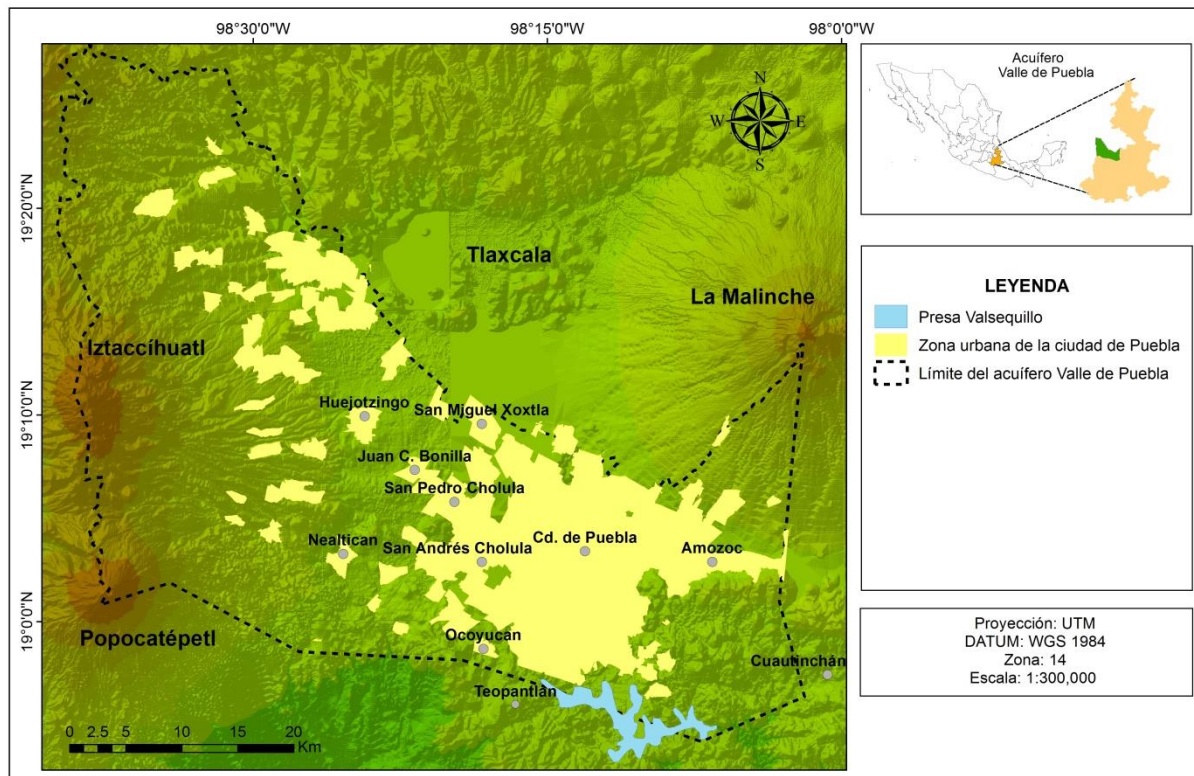
II.2 Descripción de la zona de estudio

El acuífero Valle de Puebla se localiza en la región central de la república mexicana, en el centro del estado de Puebla. El área de estudio se centra en la ciudad de Puebla y los municipios conurbados que incluye San Andrés Cholula, San Pedro Cholula, Amozoc y San Miguel Xoxtla (Figura II.1).

En la ciudad se asienta el 85% de la industria existente en el estado y el crecimiento poblacional la sitúa en la cuarta zona más poblada del país; por lo que el agua subterránea juega un papel importante al ser la principal fuente de abastecimiento.

Desde hace unos años se han manifestado los efectos de la explotación intensiva del agua subterránea en la zona urbana de la ciudad, con un descenso de niveles piezométricos y cambio de calidad del agua, esto es debido al incremento en la demanda de agua inducido por el crecimiento urbano e industrial.

Una de las medidas de los administradores de agua, fue declararla zona de veda desde 1967, lo que limita el alumbramiento de nuevos pozos y la extracción de agua (DOF, 2016).



Fuente: Elaboración propia con carta del INEGI, 2010.

Figura II.1. Localización de la zona de estudio.

II.2.1 Generalidades

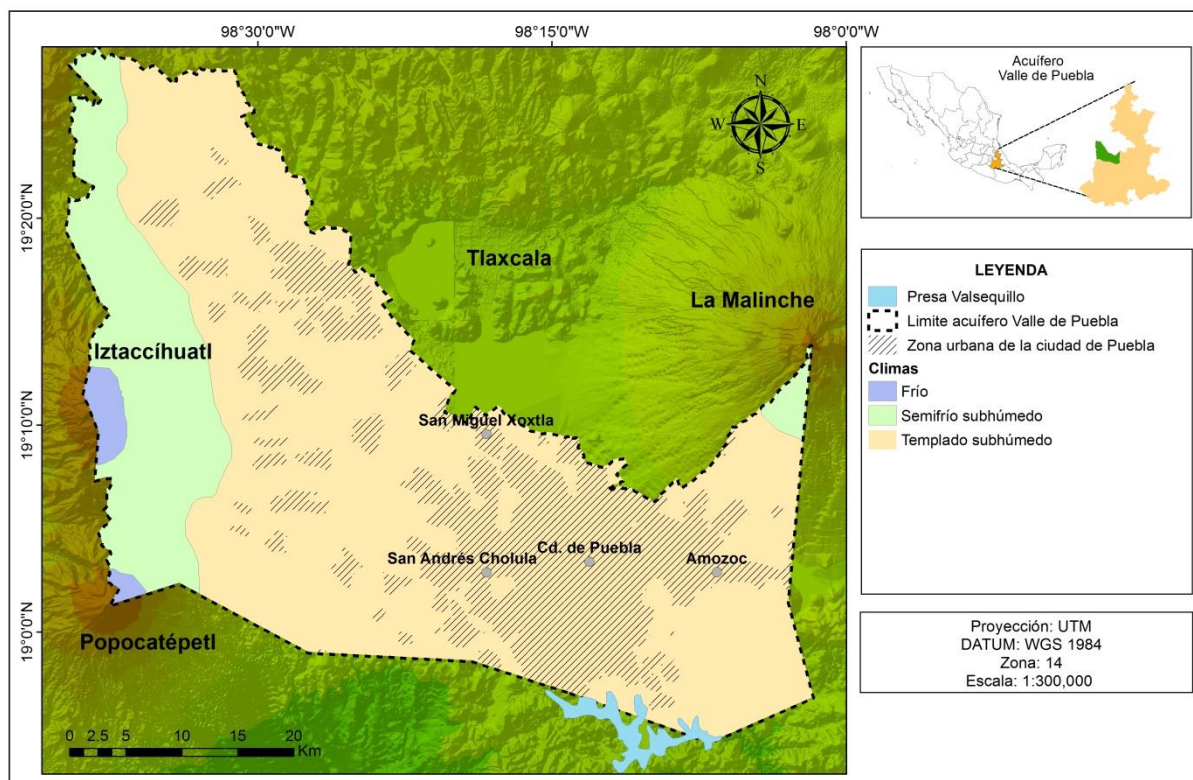
La zona de estudio queda inmersa en el denominado acuífero Valle de Puebla, en lo que administrativamente está delimitado por los acuíferos Valle de Puebla y Alto Atoyac que forman una sola unidad hidrogeológica.

El acuífero Valle de Puebla tiene una superficie aproximada de 2,025 km². El área que corresponde al acuífero queda inmersa a la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, el cual está integrado por diversos volcanes de los que destacan: Popocatépetl, Iztaccíhuatl, y la Malinche (CONAGUA, 2015b).

El área urbana de la ciudad de Puebla fuente de este estudio, se localiza en la porción centro oeste del estado de Puebla, limita al norte con el estado de Tlaxcala, al sur con el municipio Teopantlán, al surponiente con Ocoyucan, al oriente con Amozoc y Cuautinchán y al poniente con Nealtican, Juan C. Bonilla y Huejotzingo. Tiene una altura promedio de 2,149 m.s.n.m., una superficie aproximada de 524.31 km² y se encuentra entre las coordenadas 19°00'–19°10' N y 98°00'–98°20' O.

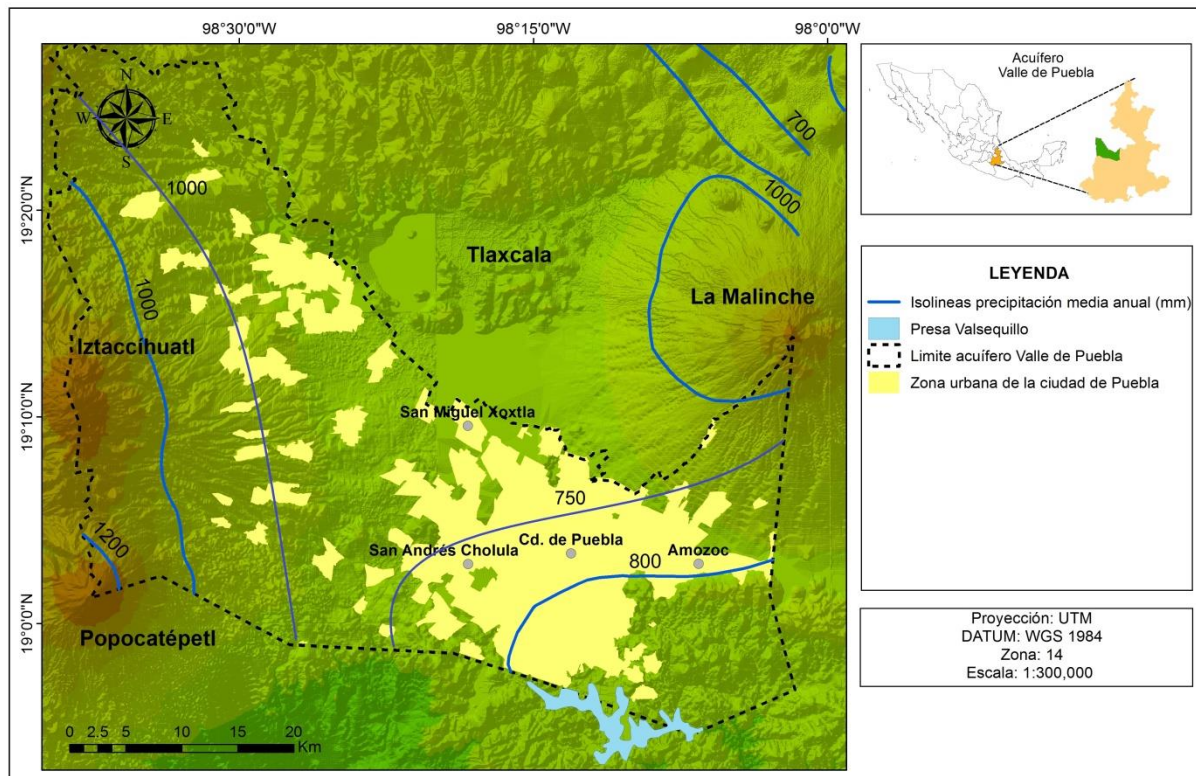
En la zona de estudio se tiene un clima templado subhúmedo con invierno frío y régimen de lluvias en verano (García, 1986; DOF, 2016). En las cumbres del volcán de La Malinche y en la Sierra Nevada se aprecian climas fríos y muy fríos, donde se tiene registrada una temperatura media anual de 4°C mientras que en la ciudad de Puebla y sus alrededores oscila entre 16 y 18°C (Figura II.2) (SEMARNAT-CONAGUA, 2005).

Conforme a la información de la CONAGUA (2015b), en la zona existe una evaporación potencial media de 1845 mm anuales y la precipitación media anual es de 860 mm. La mayor precipitación se registra en La Malinche, con 1,000 mm como valor promedio anual. En la ciudad de Puebla la precipitación varía entre 800 y 1,000 mm/año; y hacia la presa Valsequillo baja a unos 770 mm/año, (Figura II.3) (SEMARNAT-CONAGUA, 2005).



Fuente: Elaboración propia con carta del INEGI, 2010.

Figura II.2. Mapa de distribución de climas.



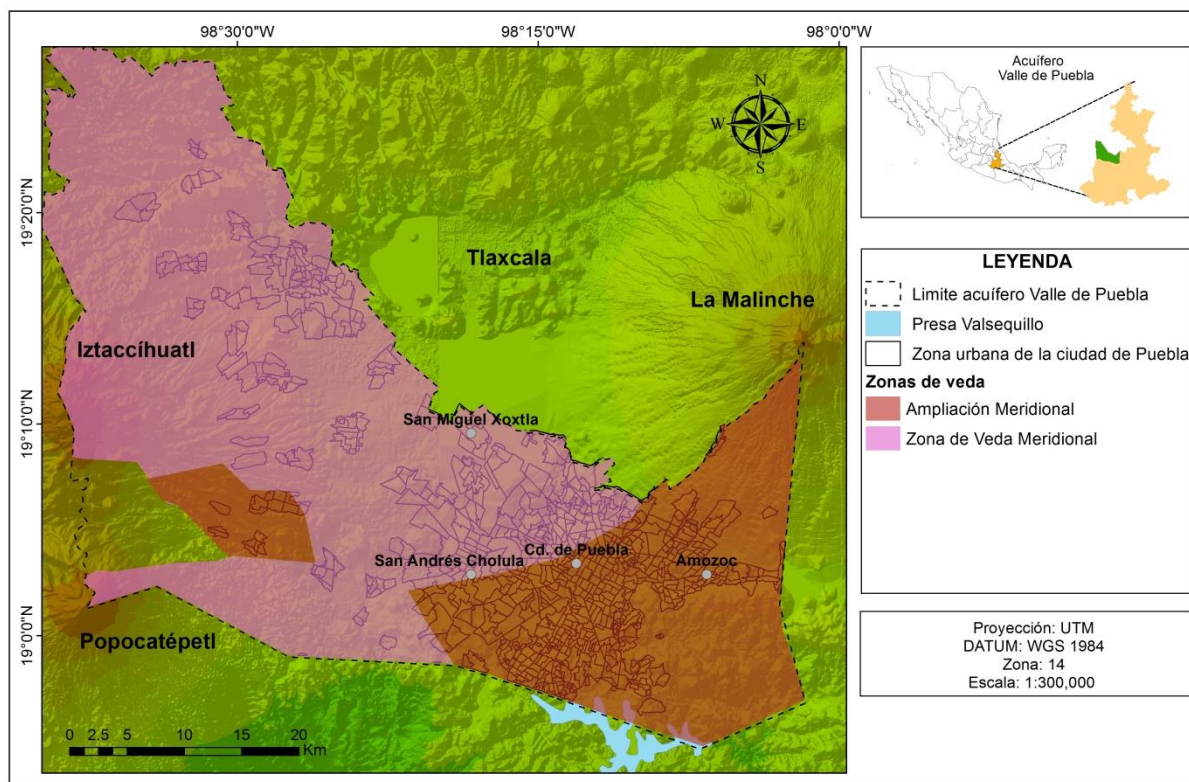
Fuente: Elaboración propia con carta del INEGI, 2010.

Figura II.3. Precipitación media anual en la zona de estudio.

Uno de los factores importantes para el desarrollo de la presente investigación es que el área del acuífero dentro del estado de Puebla (acuífero Valle de Puebla) se encuentra parcialmente vedada para el alumbramiento y explotación de aguas subterráneas mediante los decretos con fecha de 2 de junio de 1967 y 07 de julio de 1969 publicados en el Diario Oficial de la Federación el 15 de noviembre de 1967 y 30 de agosto de 1969, respectivamente. Los decretos de veda son del tipo III y señalan con carácter obligatorio obtener de la Comisión Nacional del Agua autorización para la explotación de las aguas subterráneas. Las vedas fueron denominadas “Meridional de Puebla”, y “Ampliación Meridional de Puebla”, respectivamente (Figura II.4).

Ante la creciente demanda de agua, el entonces Director General de la CONAGUA, con base en un estudio parcial realizado por la Gerencia de Aguas Subterráneas de la Subdirección General Técnica, el 31 de marzo de 1998 liberó 11 Hm³ para el estado de Puebla. Para su distribución se fijaron algunas restricciones, entre ellas, que los usuarios solicitantes se comprometieran a realizar un uso eficiente del agua en el sector agrícola y

público urbano y hacer uso eficiente y reúso del agua en la industria y servicios (SEMARNAT-CONAGUA, 2005; Salcedo, 2013; DOF, 2016).



Fuente: Elaboración propia con carta del INEGI, 2010.

Figura II.4. Decreto de veda dentro del acuífero.

II.2.2 Fisiografía

El área de estudio se encuentra dentro del eje Neovolcánico transmexicano que es una de las estructuras geológicas más importantes del país. Constituye una franja volcánica que cruza transversalmente la república mexicana a la altura del paralelo 20. El eje Neovolcánico está formado por una gran variedad de rocas volcánicas que fueron emitidas a través de un importante número de aparatos volcánicos; de los principales volcanes que se localizan en esta franja son: el pico de Orizaba, el Popocatepetl, el Iztaccihuatl, el nevado de Toluca y el nevado de Colima. Su origen está relacionado a la subducción de la placa tectónica oceánica de Cocos debajo de la corteza continental de México, mecanismo que origina los magmas del Eje Neovolcánico (Demant, 1978; UNAM-INEGI, 1984; Jiménez, 2005).

El relieve de la Sierra Nevada va aumentando en altura del norte hacia el sur; de 3,700 m.s.n.m. en el Tláloc a 5,500 m.s.n.m. en el Popocatepetl, dividida en dos partes por el paso de Río Frío.

El volcán la Malinche alcanza una altitud de 4,300 m.s.n.m., representado por un aparato volcánico del tipo estratificado como el Popocatepetl, aunque erosionado y más viejo que éste, y a la vez más joven que el volcán Iztaccíhuatl. Al sur del área estudiada, se encuentran las elevaciones de sierras calizas formadas por un paquete grueso de rocas mesozoicas con espesor de dos a tres kilómetros, con elevaciones de 2,000 a 2,400 m.s.n.m. Éstas van perdiendo altura en ondulaciones hacia el norte y finalmente desaparecen debajo de los volcanes, mesetas y planicies del Terciario y Cuaternario de la cuenca de Puebla (Jiménez, 2005; Salcedo, 2013).

II.2.3 Geomorfología

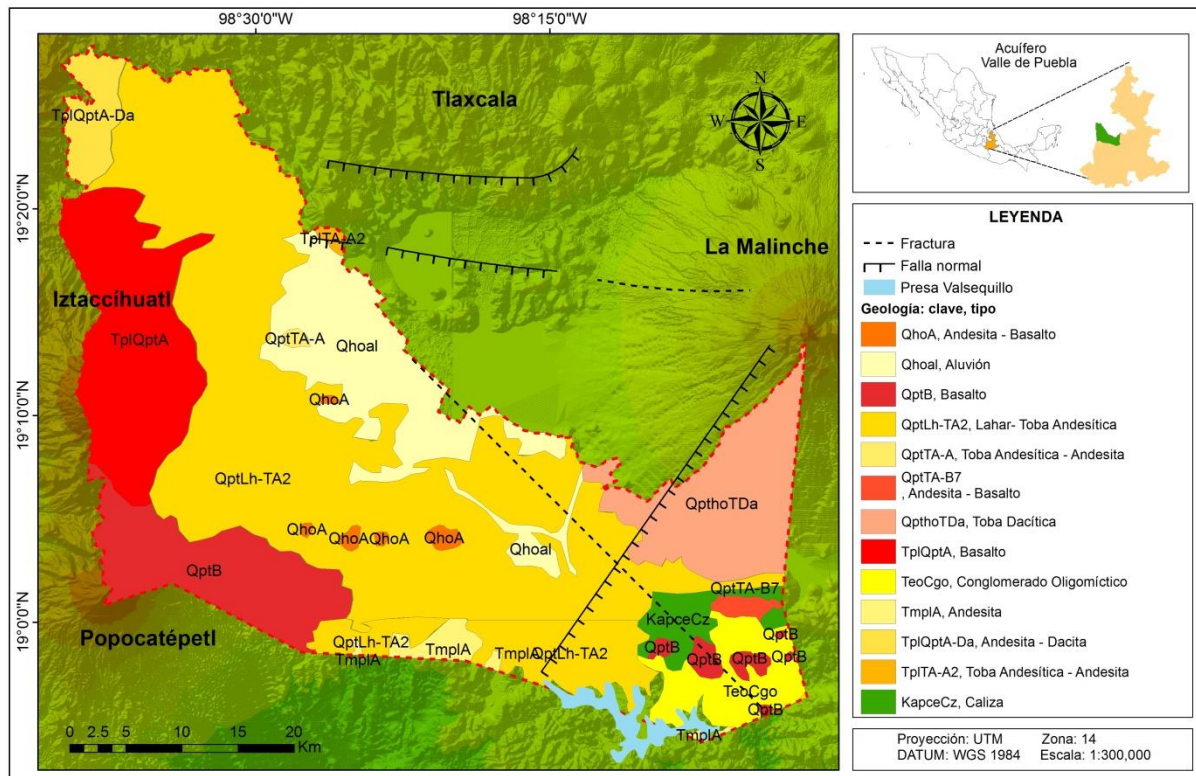
La geomorfología en la zona está constituida por cuatro tipos de relieve: Volcánico, Planicies, Mesetas y Sierras bajas. El primero está formado, por la Sierra Nevada que comprende los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Telapón, Tláloc, y Tecama. Entre la Sierra Nevada y la Malinche se encuentra una gran planicie de pendiente suave hacia el sur, con altitudes medias de 2,300 m.s.n.m. en el norte y en las inmediaciones de los volcanes, en su parte central tiene altitudes del orden de 2,200 m.s.n.m., en el sur tiene altitudes de 2,100 m.s.n.m. En el norte de la zona de estudio, en las inmediaciones de la ciudad de Tlaxcala, se localiza un bloque elevado que constituye una meseta con una altitud media de 2,300 m.s.n.m. resultado de movimientos tectónicos (Jiménez, 2005; Salcedo, 2013).

En el sureste de la zona se encuentra un conjunto de lomas de origen sedimentario formadas por calizas masivas, que forman una sierra baja llamada sierra del Tentzo con alturas de 2100 a 2300 m.s.n.m. (Salcedo, 2013).

II.2.4 Geología

Las diferentes unidades litológicas en la zona son rocas metamórficas, sedimentarias e ígneas extrusivas. A nivel regional, predominan los afloramientos de rocas volcánicas de diferente composición: andesitas, basaltos, tobas, aluvión, brechas volcánicas; así como diversas asociaciones de ellas (Figura II.5) (CONAGUA, 2015b).

De acuerdo al estudio tectónico del Valle de Puebla (Mooser, 1996), se identifican dos fracturas y dos fallas geológicas. Las fallas se localizan en la parte norte del acuífero con dirección este-oeste y en la parte este dentro del acuífero. Una falla normal se transforma en fractura y se introduce en el centro del volcán la Malinche. La falla y fractura dentro del área del acuífero tienen dirección noreste-suroeste y noroeste sureste respectivamente, interceptándose aproximadamente a 90 grados en la ciudad de Puebla (Jiménez, 2005; Gárfias *et al.*, 2010; Salcedo, 2013).



Fuente: Elaboraci3n propia con carta del COREMI, 2010.

Figura II.5. Geol3gía del acuífero Valle de Puebla.

La columna estratigráfica est3 constituida por rocas cuyas edades varían del paleozoico al reciente y representa a todos los orígenes geol3gicos: volcano-sedimentario y metam3rfico como se muestra en la Figura II.6. A continuaci3n se describen las unidades geol3gicas:

Escala de tiempo geológico	Depósito / Descripción	Litología	Espesor medio (m)	Unidad hidrogeológica	Profundidad (m)	
Cuaternario	Qal, rellenos aluviales		250	Acuífero superior	250	
	Qiv, volcanes monogenéticos, vulcanitas del cuaternario inferior					
	Qiz, formación Iztacchihuatl flujos piroclásticos:	Tobas				
		Brechas				
	Qp, formación Popocatepetl flujos de ceniza y arena					
	Qla, sedimentos lacustres					
Qtr y Qcal, rocas carbonatadas y suelos lacustres						
Plioceno	Tpl, arcillas lacustres		200	Acuitardo	450	
Eoceno-Mioceno Oligoceno	Tob, rocas carbonatadas:	conglomerado arenisca		200	Acuífero medio	650
		limolitas				
	Tm, rocas volcánicas:	tobas				
		lavas				
	Tlx, depósitos lacustres y fluviales intercalados con:	gravas				
		arenas				
		limos				
arcillas						
Cretácico inferior y superior	Ks, rocas sedimentarias calcáreo-arcillosas principalmente calizas del cretácico superior		500-1000	Acuífero profundo	1650	
	Ki, calizas cretácicas, dolomías y yeso del cretácico inferior					
	Ki, dolomías del cretácico inferior					
	Ki, yeso del cretácico inferior					
Paleozoico inferior	Esquistos		indefinido	Basamento		

Fuente: Elaboración propia con datos de Jiménez, 2005; Salcedo, 2013.

Figura II.6. Columna estratigráfica del acuífero Valle de Puebla.

Depósitos del Cuaternario Reciente (Qiv, Qla, Qal T)

Los depósitos del cuaternario están conformados por vulcanitas del Cuaternario Inferior, basaltos, andesitas, dacitas, piroclásticos producto de volcanes monogenéticos (Qiv), depósitos lacustres (Qla), rellenos aluviales (Qal) que existen en la ciudad de Puebla y en el área de la Presa Valsequillo. Ellos constituyen un paquete estratigráfico formado por la

alternancia de estratos de origen lacustre, aluvial y materiales volcánicos. Incluye materiales de la Formación Tarango (T) constituida por abanicos aluviales que se encuentran en el entorno de las corrientes o escurrimientos que se originan en las partes altas de los volcanes, conglomerados, pómez y piroclastos del Plioceno.

Los materiales de mayor abundancia superficial en el área de estudio son arenas finas limosas eólicas de origen volcánico y depósitos aluviales, que deben su origen a la erosión de los volcanes, y su transporte a los ríos Atoyac y Zahuapan y otras corrientes superficiales. El espesor medio de los estratos del Cuaternario es de 250 m (Jiménez, 2005; CONAGUA, 2015b).

Formación Iztaccíhuatl del período Cuaternario (Qiz)

La Formación Iztaccíhuatl edifica el estratovolcán Iztaccíhuatl. El espesor total se desconoce, no obstante los afloramientos en el volcán exponen un espesor máximo de 2500 m. Ésta, se constituye por secuencias efusivas cuya composición varía de andesita-basáltica a dacítica, las secuencias se inician con derrames lávicos y finalizan con intrusiones dómicas, los derrames lávicos y los domos reconocidos en campo son andesitas de olivino y/o anfíbol y dacitas de anfíbol. En el flanco nororiental del volcán Iztaccíhuatl se han observado debajo de los flujos lávicos, flujos de cenizas cristalinas y vítreas no solidificados (Vázquez y Jaimes, 1989).

Formación Popocatepetl del período Cuaternario (Qp)

La Formación Popocatepetl edifica el estratovolcán Popocatepetl, está conformado por cuatro principales secuencias eruptivas. La primera inicia con materiales piroclásticos de 8 m de espesor, seguido de brechas de avalancha cuyo espesor varía entre 200 y 450 m, cubiertas por una alternancia de lavas con pómez de espesor de hasta 2 m y flujos de ceniza cristalina y vítreas, su composición varía de andesítica-basáltica rica en olivino, piroxeno y dacítica lo que indica una mezcla de magmas. El espesor total se desconoce, sin embargo, se estima un espesor máximo aproximado de 3, 500 m (Jiménez, 2005; Salcedo, 2013).

Depósitos del Cuaternario de rocas carbonatadas y suelos lacustres (Qtr, Qcal)

Los depósitos del cuaternario se localizan y afloran en el área central de la ciudad de Puebla. Los depósitos de travertino tienen su origen en la precipitación del CaCO_3 , disuelto en el agua que proviene de un sistema hidrotermal que circula por las calizas de edad Cretácica. El espesor de estos depósitos no se ha definido con precisión, en algunos lugares es del orden de 120 m; se encuentran interestratificados con estratos de caliza, sedimentos

lacustres y volcánicos. Estos depósitos se encuentran rodeados por tobas andesíticas. La caliza se encuentra en estratos de 4 a 8 m de espesor con un porcentaje de CaCO_3 del 97% y el 3% de otros minerales (Jiménez, 2005; Salcedo, 2013).

Depósitos Lacustres del Plioceno (Tpl)

En el Plioceno medio en la cuenca de Puebla se desarrollaron diversas cuencas endorreicas someras, lo que proporcionó las condiciones para la formación de un lago intervolcánico, donde se originaron arcillas lacustres con espesor variado de hasta 200 m que además contienen escasas lavas, capas de cenizas, paleosuelos y gravas fluviales (Jiménez, 2005; CONAGUA, 2015b).

Rocas volcánicas del período Terciario y época del Mioceno-Plioceno (Tlx)

El origen de esta unidad se sitúa en la actividad volcánica de todo el Plioceno y están formadas por gravas, arenas, limos y arcillas. Se intercalan con depósitos lacustres y fluviales debido a períodos de calma en los volcanes del área (Jiménez, 2005). Los depósitos lacustres en el norte del valle de Puebla tienen 200 m de espesor y contienen escasas lavas y algunos horizontes de ceniza. En los alrededores de la ciudad de Puebla los espesores disminuyen considerablemente y llegan a medir de 30 a 50 m (CONAGUA, 2015b).

Rocas volcánicas del período Terciario y época del Mioceno (Tm)

Las rocas volcánicas del Terciario y Mioceno se constituye por tobas y lavas que afloran entre Valsequillo y Atlixco cuyo espesor varía entre 100 y 200 m. Las lavas son andesitas de lamprobolita o de augita. También incluye los depósitos de grava y arenas fluviales que afloran al sur de Puebla con mayor frecuencia que las de edad Oligoceno (Jiménez, 2005; Salcedo, 2013, CONAGUA, 2015b).

Formación Balsas (Teob) del período Terciario de la época del Eoceno Tardío a la época del Oligoceno Temprano

La Formación Balsas está constituida principalmente por rocas carbonatadas, se clasifican como conglomerados, arcosas, areniscas, limolitas y clásticos calizos compactos con limo arcillosa cementado por calcita y óxido de fierro (Jiménez, 2005; Salcedo, 2013).

Depósitos calcáreos de origen marino del período Cretácico Superior (Ks) Formación Maltrata del Turoniano

Los depósitos del Cretácico Superior se representa por rocas sedimentarias calcáreo-arcillosas de origen marino, se encuentran a una profundidad de 300 m y están constituidas principalmente por rocas calizas compactas que de acuerdo a la literatura están asociadas

con lutitas y margas; sin embargo, no se registran estratos de dichas rocas en los pozos de agua potable que alcanzaron estos depósitos. Los estratos están intensamente plegados con un espesor de 300 a 400 m. El afloramiento de la caliza Cretácica en el este de la ciudad y aproximadamente a 5 km de distancia aparece a 80 m de profundidad en el centro de la ciudad (Jiménez, 2005; Salcedo, 2013; CONAGUA, 2015b).

Depósitos calcáreos de origen marino del período Cretácico Inferior (Ki) piso Aptiano

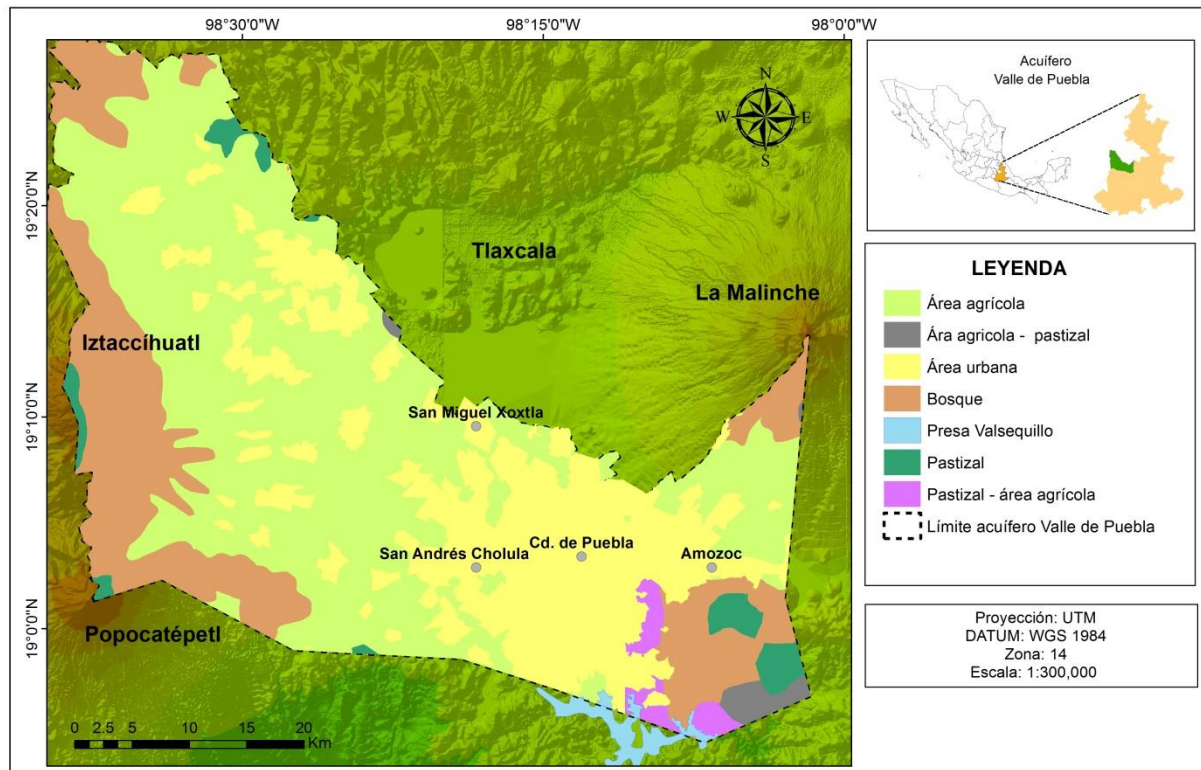
Los depósitos del Cretácico Inferior están formados de caliza arrecifales, estratos de caliza densa, rocas dolomías y minerales de yeso y anhidrita. Dichos depósitos forman paquetes estratigráficos de 500 – 1000 m de espesor (UNAM-INEGI, 1984) los cuales debido a los esfuerzos tectónicos formaron plegamientos y cabalgaduras durante la orogénia Laramídica de la época del Eoceno inferior (Jiménez, 2005; Salcedo, 2013).

Complejo Acatlán correspondiente al periodo Paleozoico inferior

La unidad del Complejo Acatlán está formada por una secuencia plegada y afectada por metamorfismo regional. Sus rocas más antiguas están formadas por esquistos verdosos de biotita con intervalos de cuarcita, migmatita, anfibolita, eclogita, roca verde metagabro, serpentinita, metagrauvaca meta-arcosa, metaconglomerado y esquisto pelítico formados por metamorfismo regional de bajo grado con plegamientos intensos (Jiménez, 2005; CONAGUA, 2015b).

II.2.5 Uso de suelo y cobertura vegetal

La cobertura vegetal y el uso de suelo en la zona del acuífero son variados, el 73% es de tipo agrícola, el 13% es zona urbana, el 8.5% es área forestal donde se produce la principal recarga de agua subterránea y el 5.5% es zona de pastizal (Figura II.7) (Salcedo *et al.*, 2016). Aunque en la zona metropolitana se ha ido observando un fenómeno de urbanización- industrialización de la ciudad que ha consolidado un nuevo nodo de servicios en la zona urbana de la ciudad de Puebla con los municipios de San Pedro Cholula y San Andrés Cholula (Ayuntamiento de Puebla, 2014).



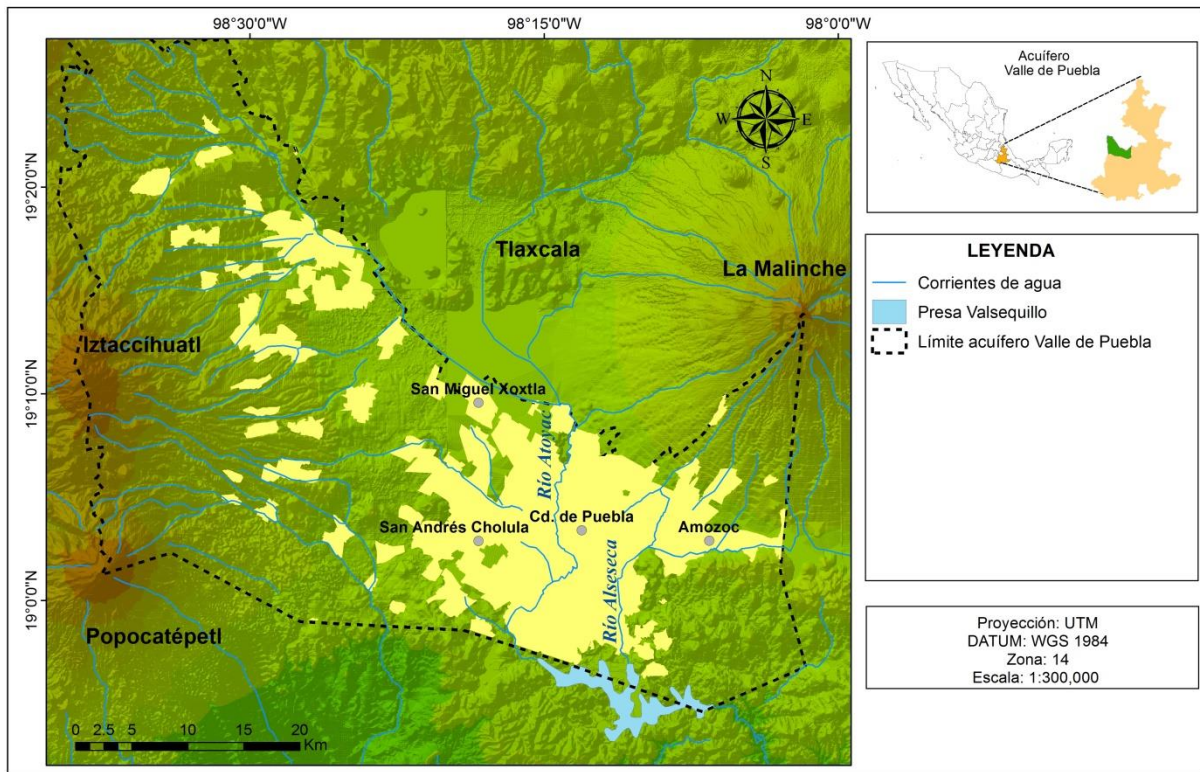
Fuente: Elaboración propia con carta del INEGI, 2010.

Figura II.7. Uso de suelo y cobertura vegetal.

II.2.6 Hidrología superficial

La zona de estudio se ubica en la región hidrológica 18 “Río Balsas”. El río Atoyac es la corriente principal y atraviesa la ciudad de Puebla (Figura II.8); es un río perenne que fluye en dirección noroeste-sureste, se origina por los escurrimientos del flanco oriental del volcán Iztaccíhuatl y las precipitaciones pluviales de los volcanes monogenéticos Tláloc, Telapón y Tecama. Recibe aportaciones de los ríos Coronado y Malinche. Entre las corrientes que descargan en el cauce del río Atoyac en sus primeros kilómetros son: el río Tlahuapan, Turin, Otlali, Atotonilco y San Jerónimo. Adopta el nombre de río Atoyac a partir de la integración de los ríos Turin y Zahuapan (Jiménez, 2005).

El río Atoyac recibe aportaciones de aguas negras domésticas e industriales en gran parte de la ciudad de Puebla para finalmente descargar en la Presa Valsequillo “Manuel Ávila Camacho” (Jiménez, 2005; Salcedo, 2013; CONAGUA, 2015b).



Fuente: Elaboración propia con carta del INEGI, 2010.

Figura II.8. Red hidrográfica del acuífero Valle de Puebla.

II.2.7 Hidrogeología

II.2.7.1 Niveles acuíferos

El acuífero está integrado por cuatro unidades hidrogeológicas: un acuífero superior, un acuitardo, un acuífero medio, y un acuífero profundo. En el acuífero se identifican una falla normal que tienen dirección noreste-suroeste y un fracturamiento regional que tiene dirección noroeste sureste (SEMARNAT-CONAGUA, 2005; Flores *et al.*, 2006; Gárfias *et al.*, 2010; Salcedo *et al.*, 2013). A continuación se describen las unidades hidrogeológicas:

a) Acuífero superior

El acuífero superior comprende formaciones sedimentarias granulares y también formaciones rocosas fracturadas constituida por rocas ígneas andesíticas y basálticas de edad Cuaternario, provenientes de los derrames lávicos de los distintos conos volcánicos de las sierras. El acuífero es de tipo libre, en general, tiene alta conductividad hidráulica, el agua tiene buena calidad y es aceptable para el consumo humano (Flores *et al.*, 2006; Salcedo *et al.*, 2013).

b) Acuitardo

El acuitardo es la frontera inferior del acuífero libre y la frontera superior del acuífero medio, se compone de depósitos lacustres de arcilla del Plioceno; en algunos sitios se llega a presentar como la matriz envolvente de arenas volcánicas y gravas (Jiménez, 2005).

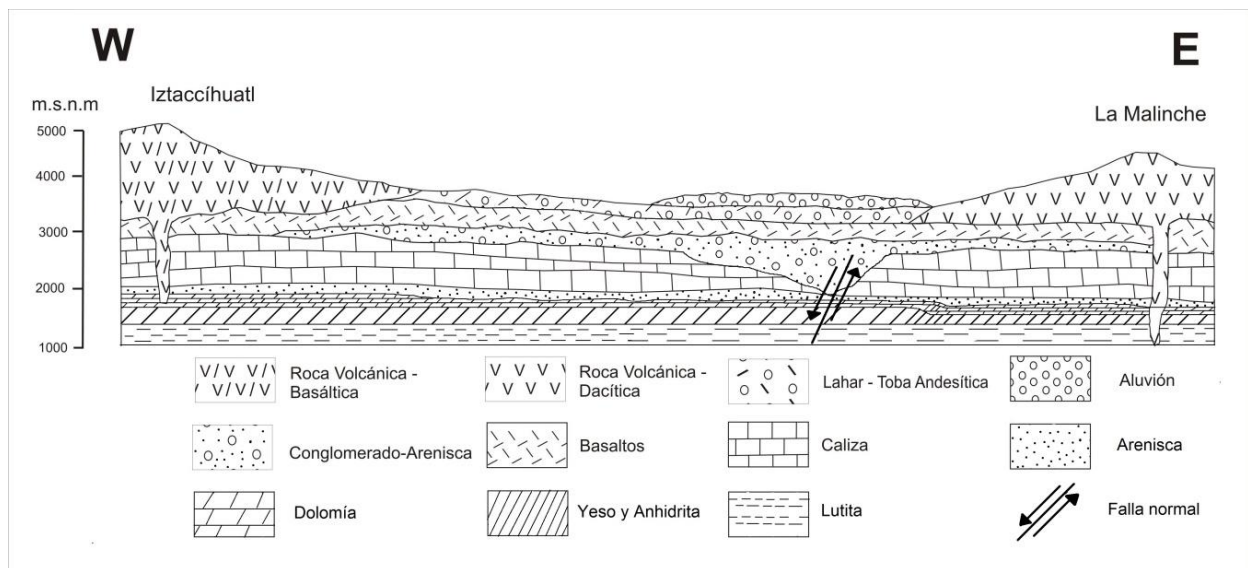
c) Acuífero medio

El acuífero medio (semiconfinado) está formado por materiales de la formación Balsas, rocas volcánicas del Eoceno, Mioceno y Oligoceno; la fracturación muestra porosidad secundaria (Jiménez, 2005; Salcedo *et al.*, 2013).

d) Acuífero profundo

El acuífero profundo está formado por materiales heterogéneos, en el predominan depósitos de origen marino del cretácico inferior y superior principalmente calizas, también contiene depósitos de dolomías y evaporitas (Flores *et al.*, 2006; Gárfias *et al.*, 2010; Salcedo *et al.*, 2013; CONAGUA, 2015b).

En la Figura II.9 se muestra la sección geológica del área de estudio elaborada por Salcedo *et al.*, (2016). Este corte geológico fue modificado para identificar la falla normal que atraviesa de noreste a suroeste. El corte comienza en las faldas del volcán Iztaccíhuatl hasta las del volcán la Malinche. La estratigrafía está conformada por aluviones y depósitos lacustres, en los costados por rocas volcánicas, seguido de depósitos volcánicos del Terciario conformados por rocas piroclásticas, derrames andesíticos y basálticos. Posteriormente se encuentran las rocas marinas del Cretácico Inferior y superior representadas principalmente por calizas, rocas dolomías y lajas de yeso o anhidrita.



Fuente: Modificada del artículo Salcedo *et al.*, 2016.

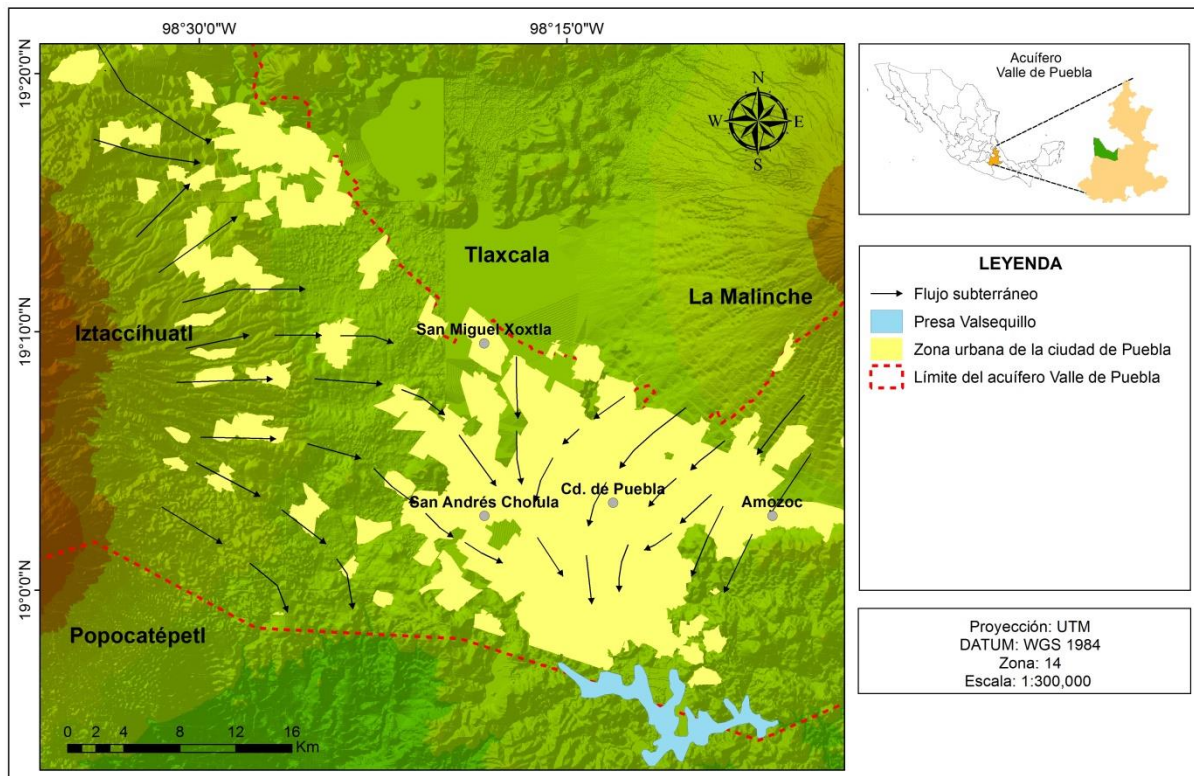
Figura II.9. Sección geológica del acuífero Valle de Puebla.

II.2.7.2 Flujo del agua subterránea

En el acuífero Valle de Puebla la dirección preferencial del flujo subterráneo es la siguiente:

- Noroeste – sureste, que inicia en los flancos del Popocatepetl e Iztaccíhuatl hacia la zona de descarga natural de la cuenca,
- Noreste – suroeste, desde la Malinche dirigiéndose hacia el río Atoyac y Zahuapan,
- Norte - sur, con alimentaciones de la zona de Tlaxcala hacia la ciudad de Puebla (Fuente: Elaboración propia con carta del INEGI, 2010.
- Figura II.10).

La recarga del agua subterránea se da directamente en las regiones altas como son las estribaciones del volcán La Malinche y la Sierra Nevada, también existe una recarga proveniente de la zona alta de Tlaxcala.



Fuente: Elaboración propia con carta del INEGI, 2010.

Figura II.10. Dirección del flujo subterráneo del acuífero Valle de Puebla.

II.2.7.3 Balance de agua subterránea

De acuerdo al informe publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF, 2016) se presentó la disponibilidad del agua subterránea y el balance hídrico realizado por la CONAGUA (2015b) para el periodo 1997 – 2010.

La disponibilidad se define como la diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga) y representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en un periodo establecido (DOF, 2016). Los resultados del balance indican que el acuífero Valle de Puebla presenta un cambio de almacenamiento promedio anual de $-28.2 \text{ Hm}^3/\text{año}$, debido a la explotación intensiva del recurso hídrico subterráneo como se observa en la Tabla II.1.

Tabla II.1. Balance de agua subterránea en el acuífero Valle de Puebla.

Entradas				Salidas				Cambio de almacenamiento
Eh	Iv	Ir	TOTAL	Db	Dm	Sh	TOTAL	ΔV (s)
196.8	116.5	47.4	360.7	327.7	19	42.2	388.9	-28.2

Fuente: DOF, 2016.

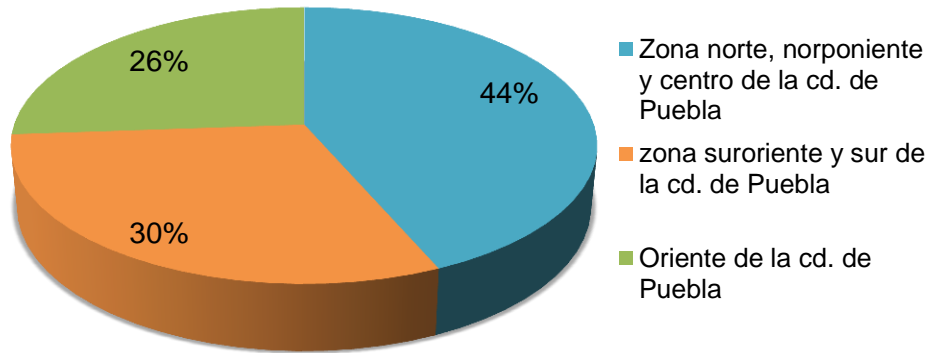
Dónde: Eh = Entradas horizontales; Iv = Infiltración vertical; Ir = Infiltración por retornos por riego y fugas en las redes de agua potable; Db = Descarga por uso en bombeo; Dm = Descarga de manantiales; Sh = Salidas horizontales; y ΔV (s) = cambio del almacenamiento en el acuífero.

II.2.7.4 Usos del agua en la zona urbana de la ciudad de Puebla

El consorcio Agua de Puebla tiene a cargo la concesión para la prestación del servicio público de agua potable, drenaje, alcantarillado, saneamiento y disposición de aguas residuales en el Municipio de Puebla, y las circunscripciones territoriales específicas de los Municipios de Cuautlancingo, San Pedro Cholula, San Andrés Cholula y Amozoc, así como la ampliación, acondicionamiento, mantenimiento, operación y administración de la infraestructura hidráulica del Sistema Operador de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Puebla o SOAPAP (Concesiones Integrales, 2014).

La principal fuente de agua potable para la ciudad de Puebla y su área industrial es el agua subterránea, el abastecimiento en la zona se realiza a través de 193 pozos concesionados; la capacidad instalada de los 193 pozos es de 3,660 litros por segundo (lps), presenta un caudal de producción de 3,607 lps, lo que representa un volumen de extracción de 113.9 millones de metros cúbicos (Mm^3) en el año 2010 (López Zamora, 2007; SOAPAP, 2010).

Del total del volumen extraído, el 43.46% corresponde a la zona norte, norponiente y centro de la ciudad de Puebla también conocida como zona del sistema Xoxtla con el 36% de los pozos; el 30.41% del volumen de extracción ocurre en la zona sur y suroriente y del sistema Nealtican con el 32% de los pozos y finalmente el 26.13% del volumen de agua en la zona de Clavijero en la zona oriente con el 32% de los pozos, (López Zamora, 2007; SOAPAP, 2010) (Figura II.11).



Fuente: SOAPAP, 2010.

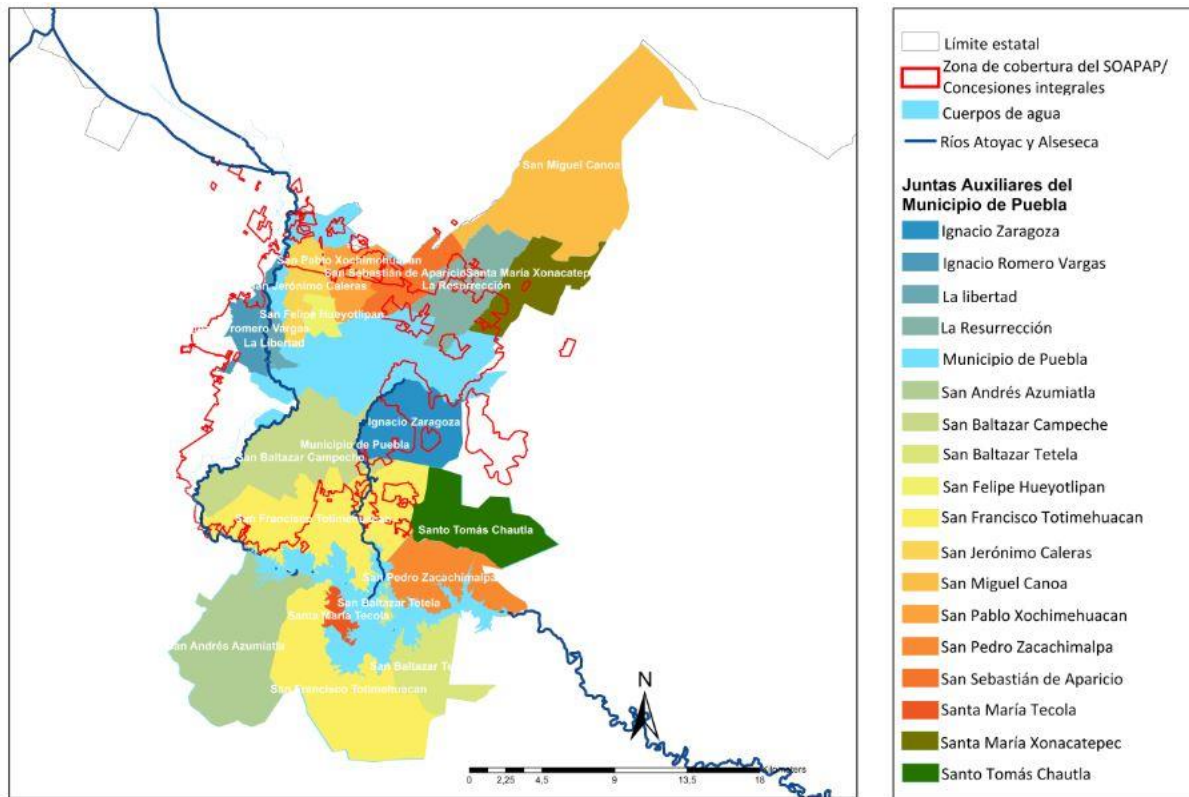
Figura II.11. Porcentaje del volumen extraído de agua subterránea en cada zona de la ciudad de Puebla.

II.2.7.5 Distribución y cobertura del agua de pozos para abastecimiento público urbano en la Ciudad de Puebla

Actualmente en la zona de la ciudad, la administración y la distribución del agua potable en el municipio de Puebla se realiza de dos maneras, principalmente a través de la empresa Agua de Puebla y de 17 juntas auxiliares que se distribuyen a lo largo del territorio.

Las juntas auxiliares son entidades desconcentradas del Ayuntamiento previstas en la Ley Orgánica Municipal de Puebla; que tienen por objeto ayudar al Ayuntamiento en el desempeño de sus funciones y cuentan con facultades específicas, señaladas en el artículo 230 de la ley Orgánica Municipal, entre ellas está procurar la debida prestación de los servicios públicos (Ramiro, 2015).

En la Figura II.12 se observa la cobertura en competencia del Sistema Operador de Agua Potable y Alcantarillado de Puebla (SOAPAP) que actualmente está a cargo de la empresa Agua de Puebla destacado en el polígono rojo y que incluye las juntas las auxiliares de: San Baltazar Campeche, San Francisco Totimehuacán, Ignacio Zaragoza, La Libertad, Ignacio Romero Vargas, San Felipe Hueyotlipan, San Jerónimo Caleras, San Sebastián de Aparicio, San Pablo Xochimehuacán, y La Resurrección (Ramiro, 2015).



Fuente: Ayuntamiento de Puebla, 2017.

Figura II.12. Zona de cobertura del SOAPAP y Concesiones integrales.

El abastecimiento de agua potable se realiza a través de la red de distribución que se alimenta mediante una batería de pozos localizados en la ciudad de Puebla y municipios conurbados; algunos pozos pasan a tratamiento a través de plantas Potabilizadoras localizadas en la zona (Quetzalcóatl y San Felipe); posteriormente se distribuye en algunos sectores mediante tanques de almacenamiento o directamente de los pozos a la red.

La competencia administrativa entre la empresa Agua de Puebla y las juntas auxiliares, ha manifestado algunos conflictos en la administración del agua que se traducen en escaso mantenimiento de los pozos, falta de agua, calidad del agua deficiente (altas concentraciones de dureza total), así como el cobro de la misma (Espinoza, 2014).

El proceso de distribución opera a través de cuatro etapas, que son: (1) la extracción del agua de los pozos, cloración y conducción; (2) potabilización (3) la regulación en tanques de almacenamiento (4) distribución por la red hidráulica del servicio a los domicilios y tomas; este proceso va variando de acuerdo con las características de caudal y calidad de cada pozo; no en todos los casos el agua se conduce a la planta potabilizadora, en algunos otros el agua no se transporta a un tanque de almacenamiento y en otros casos se distribuye

directamente. En la Tabla II.2 se presenta el proceso de distribución de los 20 pozos utilizados para el presente estudio.

Tabla II.2. Descripción de la distribución del agua de los 20 pozos utilizados para el muestreo de calidad del agua.

Pozo	Tratamiento	Almacenamiento y Distribución
Atlixcayotl 9	–	Tanque Guadalupe Hidalgo mezcla con varios pozos y distribución a los domicilios
Atlixcayotl 3	–	Tanque Rincón Arboleda mezcla con varios pozos y distribución a los domicilios
San Miguel Mayorazgo	–	Tanque San Miguel Mayorazgo mezcla con varios pozos y distribución a los domicilios
La Victoria	–	Tanque San Miguel Mayorazgo mezcla con varios pozos y distribución a los domicilios
Loma Bella	–	Tanque Gastronómico mezcla con varios pozos y distribución a los domicilios
San Jorge	–	Tanque de distribución de la unidad y distribución a los domicilios
Héroes de Puebla	–	Tanque de distribución de la unidad y distribución a los domicilios
Parque Juárez	–	Directa por la red hidráulica
Prados agua azul	–	Directa por la red hidráulica
Recta Cholula bomberos	–	Tanque Zavaleta mezcla con varios pozos y distribución a los domicilios
Momoxpan 5	Planta potabilizadora Quetzalcóatl	Tanque Zavaleta mezcla con varios pozos y distribución a los domicilios
Carcaña 3	–	Tanque Puente de México mezcla con varios pozos y distribución a los domicilios
Carretas	–	Tanque Puente de México mezcla con varios pozos y distribución a los domicilios
CNIC	–	Distribución directa por la red hidráulica a los domicilios
Sulfuroso 2	Planta potabilizadora	Almacenamiento y distribución en la red

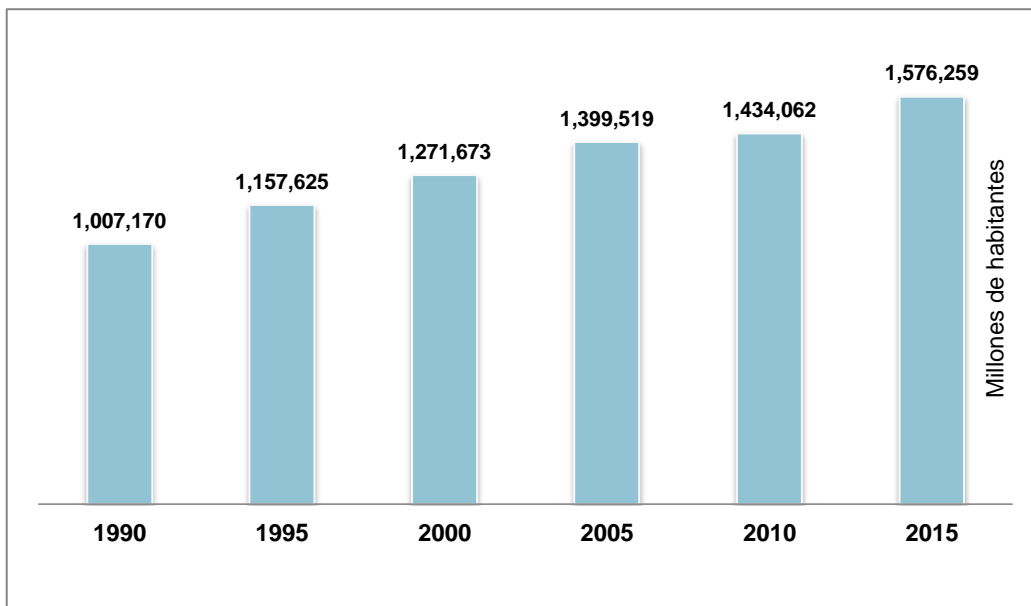
Pozo	Tratamiento	Almacenamiento y Distribución
	San Felipe	hidráulica a los domicilios
CFE 2	–	Tanque Stanley mezcla con varios pozos
Autopista	–	Tanque de almacenamiento local Infonavit San Pedro y distribución a los domicilios
San Rafael 2	–	Tanque San Rafael mezcla con varios pozos y distribución a los domicilios
San Baltazar	–	Distribución directa por la red hidráulica

Fuente: Personal administrativo de Concesiones Integrales Agua de Puebla.

II.2.8 Medio socioeconómico

II.2.8.1 Demografía

Puebla es la quinta entidad federativa más poblada de México. Es habitada por 5 779 829 personas y aproximadamente un quinto de ellas está en el municipio de Puebla (INEGI, 2015), donde se encuentra la capital del estado y aproximadamente un tercio de los habitantes del estado se encuentran en la Zona Metropolitana de Puebla. La ciudad de Puebla al censo de Población 2015 presentó 1 576 259 habitantes, siendo la ciudad más poblada de la entidad (INEGI, 2015). Este crecimiento ha convertido a la ciudad en una de las más pobladas del país; debido en gran parte al desarrollo industrial que se ha dado por la cercanía con las ciudades de México y Veracruz que le han permitido ser un intermediario para el progreso industrial. El crecimiento poblacional que ha tenido la ciudad de Puebla en el periodo de 1990 a 2015 ha sido del 57% y se representa en la Figura II.13.



Fuente: INEGI, Censos de población 1900-2010; INEGI, 2015.

Figura II.13. Crecimiento poblacional en la ciudad de Puebla, periodo 1990 – 2015.

II.2.8.2 Actividades económicas

Sector primario

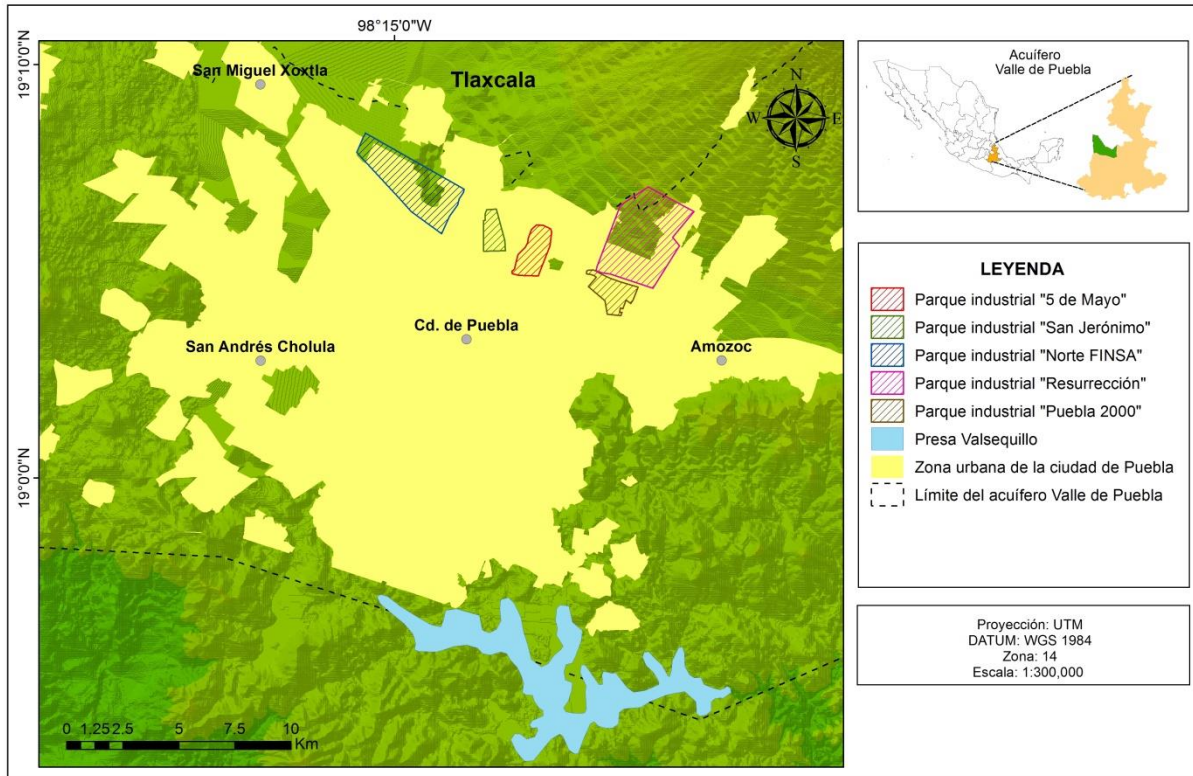
El sector primario se encuentra activo en los alrededores de Puebla, principalmente la agricultura y la ganadería; sin embargo, el cambio de uso de suelo debido a la expansión de la zona urbana e industrial ha disminuido significativamente el área para este sector, haciéndolo un sector menor de la economía (INEGI, 2015).

Sector secundario

En la ciudad de Puebla, el principal sector económico es el secundario que se basa en la industria y representa alrededor del ochenta por ciento de la economía en la zona. Dentro de la zona de estudio se localiza gran parte del sector industrial que está organizado en cinco parques: 1.- 5 de Mayo, 2.- San Jerónimo, 3.- Norte FINSA, 4.- Resurrección y 5.- Puebla 2000 (Figura II.14).

Los principales giros industriales son: textil y confección, pintura, automotriz, siderúrgica, metalmecánica, curtido, papelera, química y un sector en crecimiento es el procesamiento de alimentos. Puebla se considera como una de las principales ciudades en el sector automotriz y en la industria metalmecánica en México. La ciudad también fue pionera en la producción y exportación textil a nivel nacional y una de las mayores distribuidoras de mezclilla en México (DOF, 2016). Debido a su ubicación, su infraestructura y una completa red de comunicaciones (10,242 km de carreteras y un aeropuerto internacional), Puebla se ha convertido en una importante zona de convergencia para la actividad económica de la

región centro y sureste del país (Secretaría de Economía, 2016). En la Tabla II.3 se presentan los giros industriales más importantes en la zona y sus empresas más relevantes.



Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI, 2010.

Figura II.14. Ubicación de las principales zonas industriales en la zona urbana de Puebla.

Tabla II.3. Giros industriales y empresas más importantes de la ciudad de Puebla.

Giro industrial	Empresas relevantes
Textil	Apolo textil, Tauro Textil, Ika Textil, Milenio Textil S.A de C.V., Industrias textiles para el hogar, Acabados finos textiles S.A de C.V, La Heredera Home Textiles S.A. de C.V
Siderúrgica	Hylsa, Industria Sobasa S.A. de C.V., Metales Industriales de Puebla S.A. de C.V., Grupo LBO aluminio industrial,
Automoción/ automotriz y metalmeccánica	Grupo Schaeffler, Planta Lunkomex, Balance Qaltom Company, Industrias Norm, Benteler de México, Autotek México, Dual talleres Metalmeccánica, S.A de C. V., Metalmeccánica Flores Meza, Tecnología Y Proyectos en Manufacturas, Metalmeccánicas De Puebla S.A. De C.V., Volkswagen de México planta Puebla.

Giro industrial	Empresas relevantes
Pintura	Pintumex CEDIS, Pinturas Cuauhtemoc S.A de C.V., Pinturas Mexicanas de Puebla S.A de C.V., Val Química, Pinturas Berel Puebla, Pinturas Sherwin Williams, Industria Delta S.A. de C.V., Galvanoplastia y pinturas de Puebla S.A de C.V, Industrias Argosa, Industrias delta S.A de C.V.
Curtido	Tenería continental, Zuid México S.A. de C.V., Cia Manufacturera de Guantes Industriales S.A. de C.V., Scapa de México S.A. de C.V.
Papelera	Cartón y Papel de Puebla S.A. de C.V., Compañía Industrial Papelera Poblana S.A. de C.V.

Fuente: Secretaría de Economía, 2016.

Sector terciario

Las principales actividades del sector terciario en la zona son servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes, comercio, hoteles, restaurantes, turismo, construcción transporte, administración pública, telecomunicaciones y servicios educativos (Secretaría de Economía, 2016).

El sector terciario va en aumento principalmente por el comercio, turismo, sector hotelero y de restaurantes que están siendo promovidos como una novedosa y creciente fuente de ingresos. Estas actividades se consideran como la segunda actividad económica más importante en Puebla luego de la manufactura que representa el 18% de la producción de la entidad. En esta clasificación se centran los casos cuya actividad principal es la compra y venta sin transformación de productos nuevos y/o usados, tanto en el mercado interno como en el externo, efectuada por intermediarios y revendedores mayoristas, así como los que venden directamente al público en general, para consumo doméstico o uso personal. Además, se incluyen los establecimientos que venden alimentos y bebidas preparadas para consumo inmediato (INEGI, 2007).

III. MARCO TEÓRICO

III.1 Hidrología

La hidrología es la ciencia que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades fisicoquímicas y su relación con el ambiente y seres vivos (Chow, 1964). La hidrología se divide en hidrología superficial e hidrología subterránea o hidrogeología.

El agua cubre más del 70% de la superficie del planeta, se encuentra distribuida en océanos, lagos, ríos, glaciares, en el aire y suelo (Fagundo, 2005). El 97% de la cantidad total del agua en la tierra está contenida en los océanos; las capas de hielo y los glaciares contienen el 2%; el agua subterránea contiene el 1% de la cantidad total de agua; los ríos y lagos contienen el 0.009% mientras que el 0.001% está presente en la atmósfera (Appelo y Postma, 2005).

III.2 Agua subterránea

El agua subterránea es aquella existente bajo la superficie terrestre, se encuentra en formaciones geológicas conocidas como acuífero, y su movimiento depende de las propiedades físicas de las rocas que lo componen. Se mueve desde zonas de recarga hasta zonas de descarga; fluye a tasas de velocidad lentas que van desde 1 m/año hasta cientos de m/día, la mayor parte está en movimiento lento continuo.

Debido a las tasas del flujo lento y los tiempos de residencia largos, se producen grandes volúmenes de almacenamiento. El agua subterránea puede ser colectada mediante perforaciones, túneles o galerías de drenaje o la que fluye naturalmente hacia la superficie a través de manantiales o filtraciones a los cursos fluviales (Tuinhof *et al.*, 2006; Foster *et al.*, 2006a).

El agua adquiere su composición química mediante un proceso donde intervienen factores fisicoquímicos, geológicos, hidrogeológicos, geomorfológicos, pedológicos, climáticos, antrópicos y otros (Fagundo 2005).

III.3 Tipos de acuíferos

Un acuífero es una formación geológica que almacena volúmenes de agua que se mueven con facilidad a través de él y es capaz de suministrar agua subterránea a pozos y manantiales. Están sujetos a la gran variabilidad espacial y temporal de los eventos de precipitación y escurrimiento y a la importante variación horizontal de los perfiles del suelo así como a sus condiciones hidrogeológicas. Hay sitios donde los acuíferos están bajo

estratos poco permeables y las capas suprayacentes de estos últimos confinan (en diverso grado) las aguas subterráneas. Esto da como resultado cierto estado de aislamiento de la superficie del terreno suprayacente, pero no del sistema de agua subterránea en general (Foster *et al.*, 2006b).

Según la constitución de los materiales geológicos que limitan al acuífero, los mismos se denominan libres o confinados. A continuación se describen los diferentes tipos de acuíferos:

III.3.1 Acuífero libre

Los acuíferos libres son aquéllos que se encuentran limitados por una sola capa confinante en la base del acuífero, la porción superior está limitada por el nivel del agua (nivel estático) que se encuentra a presión atmosférica. El nivel superior del acuífero es libre de ascender o descender. Se alimenta directamente de las precipitaciones. La composición química de las aguas que se mueven en este tipo de acuífero refleja las propiedades litológicas del mismo (Martínez y Mejía, 2000; Fagundo, 2005).

III.3.1 Acuífero confinado

Los acuíferos confinados o artesianos presentan una capa impermeable suprayacente, es decir se encuentra confinado entre dos acuitardos que no permite su alimentación directa, sino a partir de una zona distante donde el material acuífero queda expuesto a la infiltración de las precipitaciones. La composición química de las aguas que discurren en los acuíferos confinados es muy constante y no refleja las propiedades del material rocoso del sitio de muestreo, sino del material que forma parte de su zona de alimentación (Martínez y Mejía, 2000; Fagundo, 2005).

Otra característica de los acuíferos confinados, es que la presión del agua es usualmente mayor que la atmosférica, por lo que si un pozo penetra un acuífero confinado el agua se elevará por encima del nivel del acuífero y en algunos casos por encima del nivel del terreno, brotando el agua espontáneamente con un caudal prácticamente constante (Martínez y Mejía, 2000; Fagundo, 2005).

III.3.2 Acuífero semiconfinado

Es una formación permeable saturada, cuyo límite superior está constituido por una capa semipermeable llamada acuitardo y cuyo límite inferior puede ser una capa impermeable o semipermeable. El agua es libre de moverse a través de los acuitardos en sentido vertical, hacia arriba o hacia abajo (Villón, 2007).

III.3.3 Acuitardo

Se define como acuitardo a la unidad geológica menos permeable dentro de una secuencia estratigráfica. Contiene apreciables cantidades de agua y la transmiten muy lentamente, por lo que no son aptos para el emplazamiento de captaciones de aguas subterráneas; sin embargo, bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos. (Freeze y Cherry, 1979).

III.4 Hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica es una compilación de varias ciencias tales como química, geología y biología. Se define como la ciencia que estudia las propiedades y composición del agua subterránea en relación con la geología regional, así como las causas y efectos de los cambios en estas propiedades. Además, esta ciencia facilita el entendimiento de diversos procesos geológicos (Tikhomirov, 2016).

Los procesos hidrogeoquímicos ayudan a tener una mejor visión de las interacciones agua-roca e influencias antropogénicas en la calidad del agua subterránea. Estos procesos geoquímicos son los responsables de las variaciones espaciales y temporales en la química del agua subterránea (Kurmar, 2006).

III.4.1 Composición química del agua subterránea

El agua subterránea adquiere su composición química mediante un proceso complejo donde intervienen muchos factores que incluyen fisicoquímicos, geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos, las precipitaciones, climáticos, antrópicos, mineralógicos, topográficos y otros (Fagundo, 1990; Güler *et al.*, 2002).

El agua subterránea está constituida por nueve iones principales (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- y SiO_2) que conforman el 99% del contenido soluto en las aguas subterráneas naturales; la concentración de cada ion depende de la trayectoria del flujo de agua subterránea, la evolución hidrogeoquímica respectiva y el tipo de roca que forma el acuífero (Foster *et al.*, 2006c).

Los compuestos traza representan únicamente el 1% de los constituyentes disueltos presentes en el agua subterránea en forma natural, pero algunas veces pueden hacerla inadecuada o inaceptable para el consumo humano; sin embargo, varios de estos elementos traza son esenciales en pequeñas cantidades para la salud humana. Los elementos traza que constituyen el agua subterránea son: V, Se, As, Cd, Co, Ni, Cr, Pb, Al, Li, Ba, Cu, Mn, U, I, P, B, Br, Fe, y Zn; es importante mencionar que no todos están siempre presentes en el agua (Foster *et al.*, 2006c).

La composición de las aguas naturales está definida por características fisicoquímicas como: la temperatura que presenta un estado de equilibrio calorífico en el acuífero y depende de la conductividad térmica e hidráulica y del nivel freático; el pH mide el grado de acidez o basicidad del agua; los sólidos disueltos totales (SDT) miden el peso de las sustancias disueltas en el agua que determinan la conductividad del medio; la conductividad eléctrica es una manera de medir la capacidad del agua para transportar la corriente eléctrica así como el contenido de especies iónicas en el agua; la dureza corresponde a la presencia de cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} y se expresa en mg/L de CaCO_3 ; la alcalinidad se define como la capacidad de neutralizar ácidos que está influenciada por el pH, temperatura y fuerza iónica (Vargas, 2004).

III.4.2 Procesos químicos en el agua subterránea

Los principales procesos que pueden disolver especies químicas en el agua subterránea son: disolución mineral y precipitación, reacciones de oxidación-reducción, intercambio iónico, adsorción e hidrólisis (Ruppe y Ginn, 2008).

III.4.2.1 Intercambio iónico

Los materiales geológicos porosos están compuestos de un porcentaje apreciable de partículas de tamaño coloidal que tienen la capacidad de intercambiar iones adsorbidos en su superficie (Fagundo, 2005).

Como resultado del proceso de intemperismo de las rocas por los agentes exógenos se originan los suelos, constituidos por minerales de tipo arcilloso. En la superficie de estos minerales se originan cargas eléctricas. En su interacción con el agua los sitios cargados adquieren grupos OH^- que quedan adsorbidos en la superficie del mineral y otras capas de cationes, así como aniones que también tienden a ser adsorbidos en la zona adyacente a la capa hidroxilada, estableciéndose una carga neta que puede ser positiva o negativa, en dependencia de las condiciones ácido-básicas presentes en el medio (Parks, 1965). Estos materiales se caracterizan por tener un desbalance eléctrico, los cuales llegan al equilibrio rodeándose de cationes o aniones según sea la carga faltante; ya que los iones están débilmente retenidos, cuando entran en contacto con el medio acuoso, pueden reemplazar valencia a valencia por otros iones del mismo signo, a este proceso se le denomina intercambio iónico (Appelo y Postma, 2005).

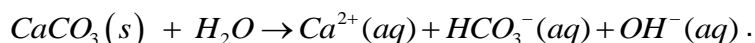
La adsorción de iones por un sólido se produce cuando la adherencia se da a la superficie del sólido, mientras que el término absorbido es referido para denotar que el ion está dentro de la superficie del sólido (Appelo y Postma, 2005).

En las aguas subterráneas, los coloides que característicamente presentan un comportamiento de intercambio iónico acentuado son las arcillas, lo cual está relacionado con su gran área superficial de contacto con el medio, siendo mayor el intercambio cuando se encuentran en tamaño coloidal (10^{-3} a 10^{-6} mm). Por lo general, las arcillas presentan carga negativa, y los materiales adsorbidos son positivos intercambiando cationes. Otros minerales de grano más grueso son envueltos por una película de materia orgánica y oxihidróxidos de hierro, y pueden cambiar aniones o cationes (Barrera, 2010).

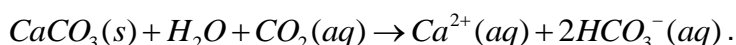
La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de un material geológico coloidal, se expresa por el número de miliequivalentes de cationes que pueden ser intercambiados en una muestra con una masa seca de 100 g (Fagundo, 2005).

III.4.2.2 Hidrólisis

El proceso de hidrólisis consiste en una reacción del agua con materiales aniónicos y/o catiónicos, formando algunas especies no disociadas (electrolitos débiles). Como resultado de la hidrólisis hay una modificación del pH de la disolución debido a que las reacciones generan iones H_3O y/o iones OH^- (Sanz, 2014). Un ejemplo de hidrólisis que puede ocurrir en el agua subterránea es la hidrólisis del ion carbonato cuando se disuelven los carbonatos minerales (Sanz, 2014):



Otro ejemplo es la hidrólisis ácida la cual es la responsable de la disolución de cantidades significativas de $CaCO_3$ y $CaMgCO_3$ en agua con alta presencia de CO_2 (Stanley, 2006):



III.4.2.3 Oxido reducción

Las reacciones de óxido-reducción ocurren a través de la transferencia de electrones de un átomo a otro entre constituyentes disueltos, gaseosos o sólidos involucrados en el ambiente del agua subterránea. La transferencia de electrones puede ser muy lenta y solo ocurre a velocidades significativas mediante la catálisis bacteriana. En las aguas subterráneas, los procesos oxido-reducción normalmente ocurren cuando hay una adición de un agente oxidante fuerte como puede ser O_2 o NO_3^- en un acuífero que contiene agentes reductores (Alfaro *et al.*, 2006).

Los procesos de oxidación y reducción ejercen un control importante en las concentraciones de O^2 , Fe^{2+} , SO_4^{2-} , H_2S y CH_4 de las aguas subterráneas por lo que determina contaminantes filtrados producto de la agricultura, la minería, tiraderos de basura, fugas de

los sistemas de aguas negras y depósitos industriales (Appelo y Postma, 2005; Freeze y Cherry, 1979).

Una medida de la tendencia de oxidación o reducción de una solución es denominada mediante el parámetro pe (Freeze y Cherry, 1979), el cual se define como:

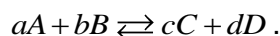
$$pe = -\log[e],$$

Donde: pe , es una cantidad adimensional que describe la actividad relativa de los electrones (Freeze y Cherry, 1979).

Una medida cuantitativa de la actividad de los electrones es el potencia redox (Eh) que es un valor relativo medido contra el punto 0 del electrodo normal de hidrógeno u otro electrodo secundario de referencia. El potencial redox se mide en milivoltios o voltios. Un valor Eh positivo y de alta magnitud indica un ambiente que favorece las reacciones de oxidación. Del otro lado, un valor Eh negativo y de baja magnitud es indicativo de un ambiente altamente reductor (Alfaro *et al.*, 2006).

III.4.2.4 Disolución mineral

La solubilidad de un mineral en el agua está controlada por distintas variables como: temperatura, presión, pH, potencial redox (Eh) y la relativa concentración de otras sustancias en la solución acuosa. Debido a que en un ambiente natural las variables se relacionan de un modo complejo, no es posible tener la exacta solubilidad de un mineral en el agua; sin embargo, la solubilidad de los minerales se rige bajo las leyes fisicoquímicas como la “ley de acción de masas” que establece que para una reacción química reversible en equilibrio a una temperatura constante, una relación determinada de concentraciones de reactivos y productos tiene un valor constante (Fagundo, 2005). La fórmula general se define a partir de la siguiente expresión:



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

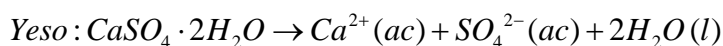
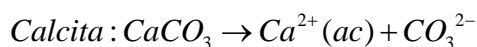
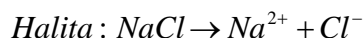
$$K = \frac{a_C^c \cdot a_D^d}{a_A^a \cdot a_B^b},$$

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 es la actividad química. A

y *B* son compuestos reaccionantes. *C* y *D* son productos de la reacción. Los superíndices *a*, *b*, *c* y *d* son número de moles (Fagundo, 2005).

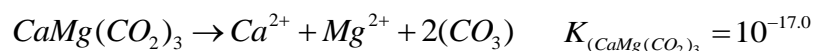
Existen algunos minerales que reaccionan rápido en contacto con el agua subterránea. Este es el caso particularmente de los minerales más solubles que son: halita, fluorita, yeso y la mayoría de los minerales carbonatados, con los cuales el equilibrio se alcanzará dentro de un intervalo de tiempo que es corto comparado con el tiempo de residencia del agua subterránea (Appelo y Postma, 2005). Existen dos tipos de disolución de minerales:

Disolución congruente: Cuando los productos de una reacción de disolución son todas especies iónicas. Este es el caso de la disolución por las aguas naturales de los minerales halita, calcita, dolomita y yeso (Fagundo, 2005):



Disolución incongruente: Se lleva a cabo cuando la disolución del mineral da lugar a especies iónicas y moléculas no solubles de naturaleza química muy distinta del compuesto inicial (mineral secundario). (Doménech y Peral, 2006).

Como ejemplo se presenta la disolución incongruente de la dolomita, que ocurre de acuerdo a la reacción:



Al disolverse la dolomita aporta iones calcio, magnesio y carbonatos. Cuando el agua se encuentre en equilibrio con la dolomita, será sobresaturada con respecto a calcita al sobrepasar su constante de solubilidad, siguiente condición: $(Ca^{2+}) \cdot (CO_3) > 10^{-8.4}$ con lo que precipitará calcita (Morell y Hernández, 2000).

III.4.2.5 Adquisición de sales

Inicialmente, el agua de lluvia que recarga un acuífero tiene escaso contenido iónico. La poca cantidad de sales que aporta la lluvia pasan al terreno con el agua de infiltración. Esta agua ocupa total o parcialmente los poros del suelo y así, puede disolver anhídrido carbónico y ácidos húmicos procedentes de la descomposición de la materia orgánica (Sánchez, 2012).

El agua de lluvia tiene pequeñas cantidades de sustancias disueltas, incluso en zonas libres de contaminación que proceden del polvo atmosférico. Una vez que se precipita el agua, las bajas cantidades de sales se concentran por destilación, es decir, si se evapora el 90% de la precipitación, en el agua restante las concentraciones se multiplicarán por 10. Por lo que al intentar explicar el origen de algunos iones en el agua subterránea se debe considerar que una parte puede no ser adquirida en la zona del acuífero, sino de la atmósfera (Sánchez, 2012). En la escorrentía superficial y a través de la zona no saturada (y en menor medida la zona saturada), hay una interacción agua-fase sólida por la que el agua va adquiriendo sustancias químicas como especies. Los factores que influyen en la disolución de sales solubles son (IMGE, S.f):

- superficie de contacto
- longitud del trayecto recorrido
- concentración de sales en la roca
- tiempo de contacto
- temperatura
- presión

La composición hidroquímica del agua subterránea está relacionada a las características mineralógicas del sustrato por donde pasa:

- silicatos → no hay sales solubles
- terrenos kársticos → aguas bicarbonatadas cálcicas o cálcico-magnésicas.
- sedimentos marinos algo arcillosos → aguas cloruradas sódicas con escaso calcio y magnesio o sulfatadas sódicas.
- sedimentos de origen continental con algo de arcilla → bicarbonatadas cálcicas.
- terrenos yesosos → sulfatadas cálcicas.
- granitos o granitos alterado → bicarbonatadas sódicas y cálcicas.
- rocas ígneas (poco soluble) → bicarbonatadas cálcicas.

III.4.3 Simulación hidrogeoquímica

La simulación hidrogeoquímica consiste en la construcción teórica o conceptual que engloba el conjunto de reacciones químicas (física y termodinámicamente coherentes) y que son responsables de la composición del agua subterránea (Tikhomirov, 2016).

La mayoría de modelos de simulación son de equilibrio, ya que al ser el flujo subterráneo relativamente lento, los conceptos de equilibrio se pueden usar de forma válida. Existen

varios softwares que realizan análisis de simulación hidrogeoquímica los más utilizados se describen a continuación:

El primero es el programa PHREEQC es un software diseñado para realizar una amplia variedad de cálculos geoquímicos acuosos que incluye la simulación química de reacciones y de procesos de transporte en aguas naturales y contaminadas (Parkhurst y Appelo, 1999).

El programa se basa en la teoría de la termodinámica que permite predecir cómo reaccionarán los componentes en sistemas de diferente complejidad, los multifases y multicomponentes y cuál será el estado final -equilibrio químico- de las soluciones acuosas y de la interacción con minerales, gases, así como experimentos de laboratorio. El algoritmo de transporte considera el equilibrio químico de las reacciones que se dan a lugar (Parkhurst y Appelo, 1999).

PHREEQC implementa varios tipos de modelos acuosos: dos modelos acuosos de asociación iónica (el modelo Lawrence Livermore y WATEQ4F), un modelo acuoso de interacción ión-específica de Pitzer y el modelo acuoso SIT (Teoría de Interacción iónica específica). Utilizando cualquiera de estos modelos acuosos, PHREEQC tiene capacidades para:

- cálculos de especiación y de índice de saturación,
- cálculos de transporte discontinuo y unidimensional (1D) con reacciones reversibles e irreversibles, que incluyen equilibrios acuosos, minerales, de gas, de solución sólida, de formación de complejo e intercambio iónico, y transferencias molares especificadas de reactivos, reacciones cinéticamente controladas, mezcla de soluciones y cambios de presión y temperatura,
- modelado inverso, que encuentra conjuntos de transferencias de moles de gas y minerales que tienen en cuenta las diferencias en la composición entre aguas dentro de límites de incertidumbre de composición especificados. Cuenta con varias versiones de bases de datos, los cuales incluyen diferentes reacciones y elementos necesarios para la acción que se requiera (Parkhurst y Appelo, 1999).

El segundo programa es The Geochemist's Workbench es un software que tiene sus inicios en 1991, está integrado por un conjunto de herramientas interactivas para realizar modelación hidrogeoquímica en un sistema acuoso. El programa está integrado por dos ediciones GWB Standard que incluye modelación de reacciones, distribución de especies, modelado de interacción agua-roca y simulación de mezclas de fluido y GWB Essential que realiza tareas más comunes en el modelado geoquímico, como equilibrio de reacciones,

cálculo de las constantes de equilibrio, y diagramas Eh-pH. La interfaz gráfica de usuario está simplificada para un uso amigable del código de geoquímica (Aqueous Solutions, 2016).

III.4.4 Índice de saturación

El índice de saturación es un cálculo útil para identificar los procesos de disolución-precipitación de los minerales que determinan la composición del agua subterránea con respecto a un mineral. Su valor es una medida del punto de equilibrio del agua con respecto a las fases minerales (Alley, 1993). Se calcula de la siguiente manera.

$$IS = \log(IAP / Kps),$$

Dónde: *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.

III.4.5 Representación gráfica de la composición química de las aguas subterráneas

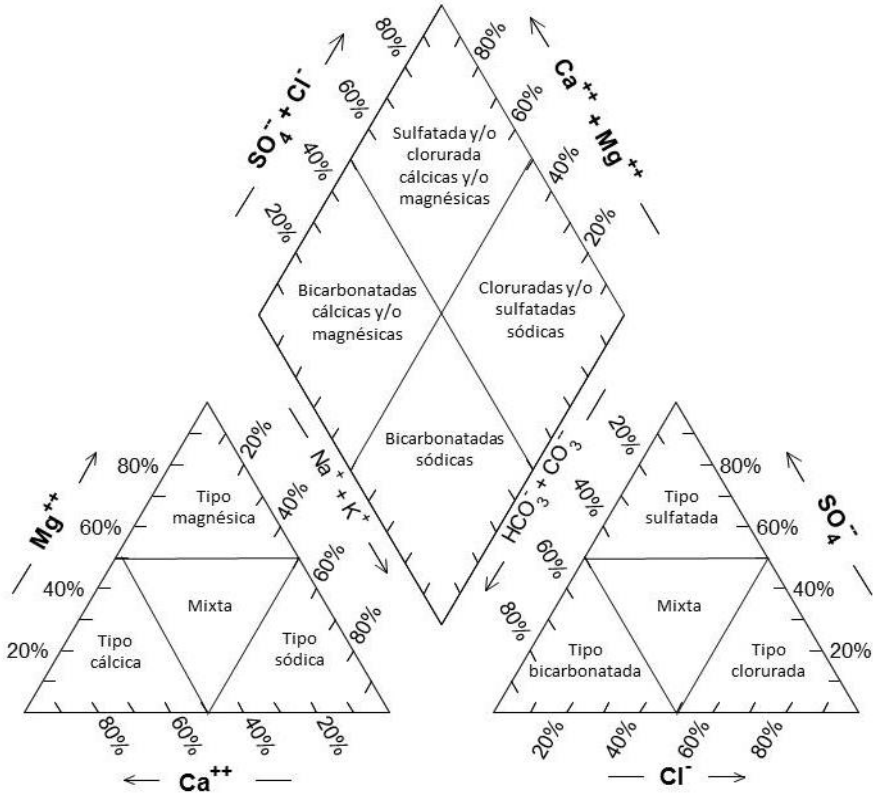
La representación gráfica de los datos hidroquímicos es una herramienta muy eficaz para interpretar las propiedades de un agua, así como para hacer comparaciones. También permite ver con facilidad el comportamiento y evolución de un agua en un territorio determinado y a través del tiempo (Fagundo, 1996).

Se han desarrollado diversos métodos gráficos que muestran la composición química del agua subterránea como son: diagramas de columnas triangulares, circulares, poligonales, logarítmicas. Los diagramas más utilizados son diagrama de Stiff, diagrama de Piper y diagrama de Schoeller. Cada uno presenta ventajas y limitaciones específicas (Fagundo, 2005).

Diagrama de Piper: Se trata de un diagrama triangular compuesto por dos triángulos equiláteros en que se representa, respectivamente, la composición aniónica y catiónica del agua de que se trate y un campo central romboidal en que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes. Es necesario reducir las concentraciones de los iones, expresadas en mili equivalentes/litro a % y sólo se pueden reunir en cada triángulo tres aniones y/o tres cationes. A cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión. Como aniones se suelen representar: HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- y NO_3^- , como cationes: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} (Fagundo, 2005) (Figura III.1).

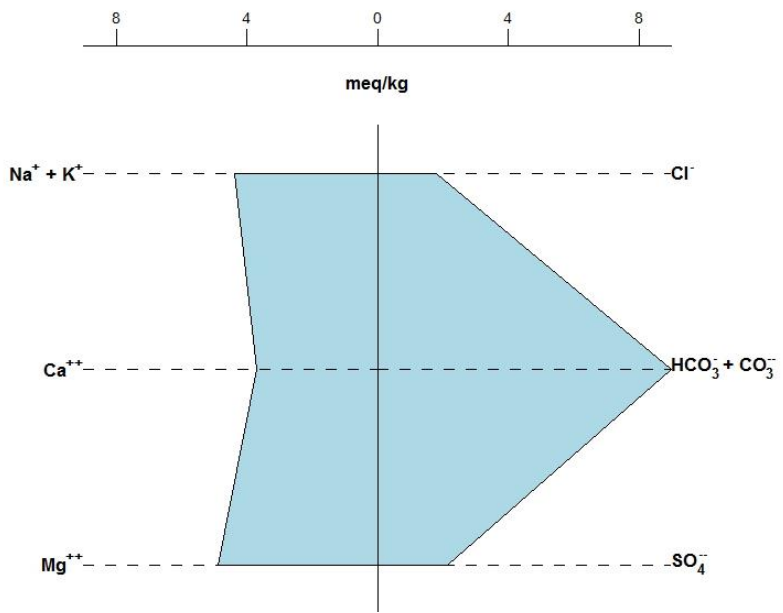
Diagrama de Stiff: Son polígonos que normalmente se sitúan sobre un mapa para mostrar la distribución geográfica de la composición de las aguas. Se forman con 3 ejes paralelos hacia la izquierda (cationes) y otros tres hacia la derecha (aniones). La distancia entre los ejes horizontales es arbitraria, simplemente estética, y la escala elegida en horizontal dependerá de la salinidad de las aguas de la región estudiada. La longitud y escala se establecen a partir del análisis de concentraciones más elevadas. Se sitúan las concentraciones en cada uno de los seis ejes en meq/L y después se unen formando un polígono (Fagundo, 2005) (Figura III.2).

Diagrama de Schoeller: Se disponen varias semirrectas o columnas verticales paralelas, igualmente espaciadas y divididas en escala logarítmica y con el mismo módulo. A cada semirrecta se le asocia un anión o un catión, excepto la primera columna que no tiene asociada ningún ion y su unidad de medida es en meq/L, cada dato de aniones y cationes es representado por una serie de puntos, uno por eje, los cuales están conectados por una línea recta formando un perfil (Fagundo, 2005) (Figura III.3).



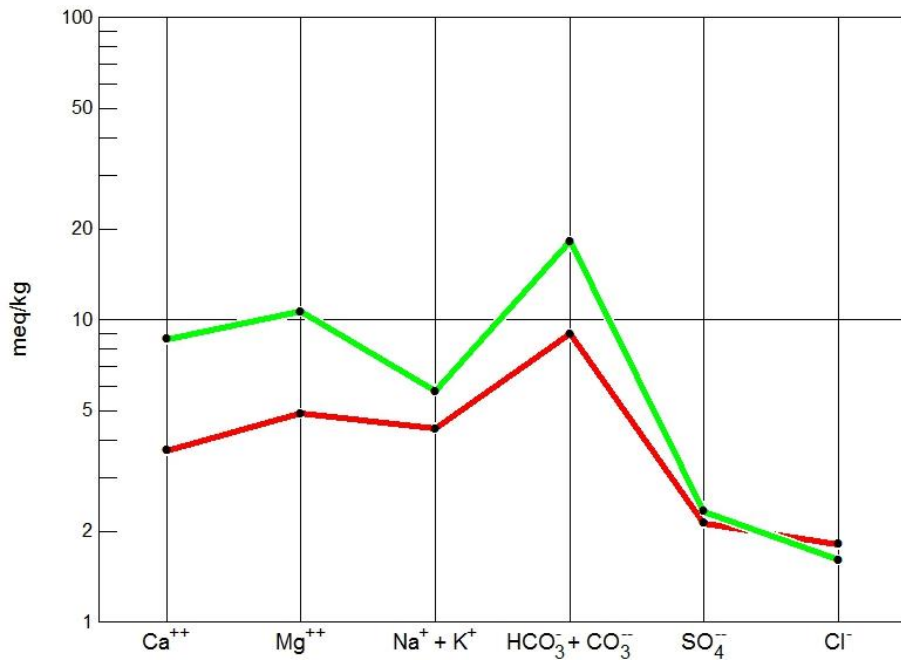
Fuente: Elaboración propia.

Figura III.1. Representación de un diagrama de piper.



Fuente: Elaboración propia

Figura III.2. Representación de diagramas de Stiff.



Fuente: Elaboración propia

Figura III.3. Representación de un diagrama de Schoeller.

III.4.5.1 Representación mediante sistemas de tipo geoestadístico y SIG.

Los mapas hidrogeoquímicos ofrecen una valiosa información sobre las relaciones existentes entre el quimismo de las aguas y las condiciones geológicas, así como físico-geográficas, cuando se superponen en el mismo la litología, la red de drenaje y los diagramas con la composición química de las aguas (Portilla, 2001).

Los sistemas automatizados basados en métodos geoestadísticos, tales como SURFER y otros integrados en paquetes de programas de tipo hidrogeoquímico han sido ampliamente utilizados para representar variables en forma espacial. Ello ha permitido la creación de mapas de contenidos iónicos y de otras propiedades hidrogeológicas. En particular el sistema SURFER, que usa funciones de Kriging, realiza mapas de isocontenidos basados en un sistema de interpolación de las variables, las cuales son distribuidas en el espacio de dos dimensiones. Además, están los Sistemas de Información Geográficos (SIG), que mediante un grupo de opciones crea mapas similares con más facilidad como es el caso de Arc GIS (Fagundo, 2005).

III.5 Análisis estadístico multivariado: Cluster ó Análisis de Conglomerados

El análisis estadístico multivariado es una herramienta ampliamente utilizada para analizar e interpretar grandes conjuntos de datos hidrogeoquímicos. Es utilizada principalmente para identificar la fuente de los solutos así como la relación entre variables y grupos de agua (Meng y Maynard, 2001; Nyenje *et al.*, 2014).

El análisis de Cluster (o Análisis de conglomerados), es una técnica de análisis exploratorio de datos para resolver problemas de clasificación. Este método utiliza la información de una serie de variables para cada objeto y conforme a estas variables se mide la similitud entre ellos. Una vez medida la similitud, se agrupan en conjuntos homogéneos internamente y diferentes entre sí. Es una de las técnicas más aplicadas para el análisis estadístico de datos hidroquímicos, debido a que proporciona un mejor entendimiento de las características fisicoquímicas de agua subterránea y permite clasificar el agua en grupos de acuerdo a su origen, circulación y evolución hidrogeoquímica. Además, permite hacer una comparación entre las diferencias de cada agrupación (Yidana *et al.*, 2008; 2011; Hamzaoui *et al.*, 2013).

IV. JUSTIFICACIÓN

El agua subterránea del acuífero Valle de Puebla constituye la única fuente de abastecimiento en la zona urbana de Puebla. El crecimiento poblacional en la zona de estudio se ha manifestado acelerado de 532,744 en 1970 a 1, 576,259 en 2015, lo cual se ha mostrado en la expansión del área metropolitana de la ciudad de Puebla a los municipios conurbados. Dicha situación se ha intensificado con el establecimiento de una zona industrial al norte de la ciudad y la construcción de la autopista que marco la expansión de la ciudad hacia el oeste. Esto, en conjunto con el cambio de uso de suelo para el desarrollo de la Angelópolis en 1993, ha ocasionado una mayor demanda de servicios como el agua, que están sujetos a una sola fuente debido a la alta contaminación que se presenta en las fuentes superficiales como el río Atoyac y Alseseca que atraviesan la ciudad de Puebla (Salcedo *et al.*, 2016).

Consecuencias de esta problemática han sido la explotación intensiva que ha marcado descensos de los niveles piezométricos en la zona urbana de Puebla, baja productividad en algunos pozos, el agrietamiento del terreno y un cambio en la composición química del agua por el agotamiento del agua en el acuífero superior (Gárfias *et al.*, 2010; Salcedo *et al.*, 2013).

Diferentes estudios desde el 2005 han identificado el cambio en la calidad del agua, que se había manifestado en el aumento de calcio, magnesio, sulfatos, sólidos disueltos totales y dureza total; sin embargo no se han reportado estudios de los metales pesados en el agua (Arroyo, 2005; Flores *et al.*, 2006; Gárfias *et al.*, 2010; Salcedo *et al.*, 2013; CONAGUA, 2015).

A partir de esta problemática surge la importancia de evaluar los impactos en la calidad del agua que abastece a la zona urbana de Puebla por efecto de la explotación del acuífero, utilizando una combinación de metodologías y técnicas para lograr este objetivo.

V. HIPÓTESIS

La explotación intensiva en la zona urbana del acuífero Valle de Puebla podría causar un cambio en la composición química del agua subterránea.

VI. OBJETIVOS

VI.1 Objetivo General

Determinar los efectos de la extracción intensiva en la calidad del agua subterránea de la zona urbana de la ciudad de Puebla.

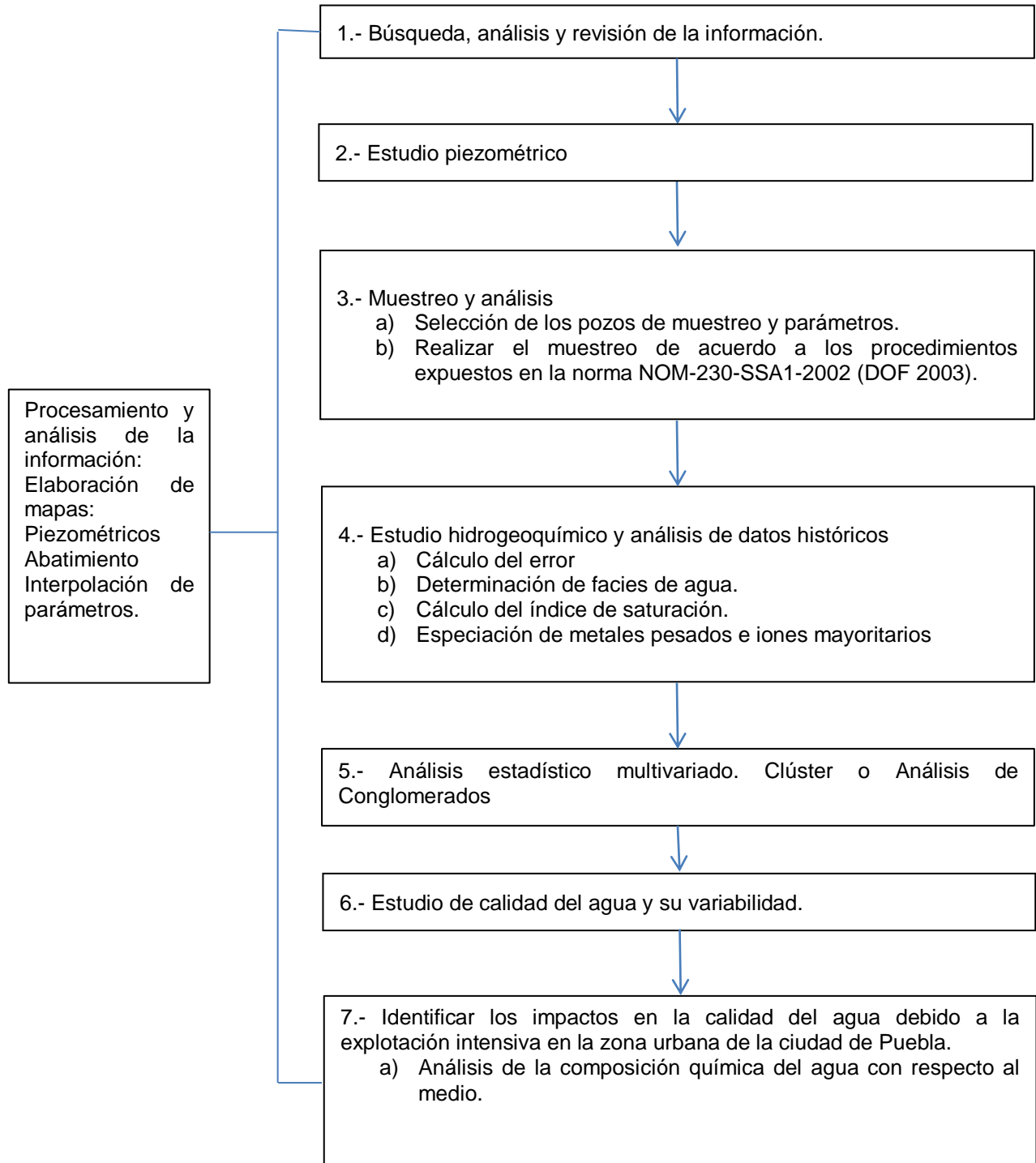
VI.2 Objetivos Particulares

1. Revisar los datos históricos de la calidad del agua de abastecimiento público de la zona urbana de Puebla.
2. Analizar la evolución piezométrica en el acuífero Valle de Puebla.
3. Monitorear y analizar parámetros fisicoquímicos en pozos de abastecimiento público urbano.
4. Interpretar información hidrogeoquímica del agua subterránea a través de herramientas de simulación.
5. Realizar un análisis estadístico multivariado de los datos fisicoquímicos e hidrogeoquímicos.
6. Analizar la calidad del agua y su variabilidad.
7. Identificar los impactos en la calidad del agua debido a la explotación intensiva de los pozos de abastecimiento ubicados en la zona urbana de la ciudad de Puebla y regionalizar la problemática.

VII. MATERIALES Y METODOS

VII.1 Diagrama de flujo de las actividades

En el siguiente esquema se presentan las etapas generales que se siguieron para llevar a cabo la metodología.



VII.2 Búsqueda, análisis y revisión de la información

Búsqueda, análisis y revisión de información fisicoquímica, de calidad del agua y de niveles de agua subterránea de los pozos de abastecimiento en la ciudad de Puebla y de estudios previos realizados en el acuífero Valle de Puebla. Se efectuó la búsqueda en diferentes fuentes de información entre ellas: dependencias gubernamentales como la CONAGUA, dependencias municipales como el SOAPAP, empresas como el consorcio Agua de Puebla, revistas, artículos, informes técnicos y tesis. La recopilación de los datos fisicoquímicos de los pozos de agua potable en Puebla se hizo para los años 2011, 2013 y 2014. Los datos de los niveles de agua de los pozos de bombeo ubicados en la ciudad de Puebla se consultaron para los años 2002 y 2012.

VII.2.1 Procesamiento y análisis de la información

Se elaboraron mapas temáticos para la interpretación de la información fisicoquímica que incluye:

- Mapas de isopiezas del nivel piezométrico.
- Mapas de evolución del nivel del agua.
- Mapa de evaluación espacial de calidad del agua.
- Mapas de identificación de las familias de agua.

VII.3 Estudio piezométrico

Con el fin de determinar las variaciones en los niveles del agua subterránea en la zona de la ciudad de Puebla, se consultó los datos de los niveles piezométricos. La información se obtuvo de la Comisión Nacional del Agua.

Con respecto a los niveles de agua subterránea, se obtuvo información del 2002 al 2012 de 132 pozos de la red de monitoreo multinivel en la ciudad de Puebla. Se revisaron los datos que incluye las mediciones de nivel de agua subterránea para cada pozo de monitoreo, y coordenadas geográficas y se realizó una base de datos.

Una vez completada la base de datos, se elaboraron los mapas de isopiezas del nivel del agua subterránea en los años 2002 y 2012 en la zona de estudio. Posteriormente se determinó la evolución del nivel del agua durante el 2002 – 2012 calculando la diferencia entre los niveles de agua en el periodo mencionado anteriormente. Los resultados de la evolución temporal se interpolaron en un mapa de la zona de estudio. La interpolación entre puntos se realizó utilizando el método kriging con el software Arc Map (ESRI, 2011). Además, se realizó la interpolación con el software Surfer V.6 (Golden Software Inc. 1997) para corroborar los resultados obtenidos en Arc Map.

VII.4 Muestreo y análisis

VII.4.1 Selección de los pozos de monitoreo 2016

En esta etapa de la investigación se realizó un monitoreo de calidad del agua subterránea de un grupo de 20 pozos distribuidos en la ciudad de Puebla. Los pozos se seleccionaron con base en la información histórica recopilada para realizar un análisis de la variabilidad histórica de calidad del agua. Los puntos muestreados se seleccionaron para verificar y comparar la tendencia y evolución de la calidad del agua que ha llevado el acuífero en la zona urbana. En la Tabla VII.1y la Figura VII.1 se presenta la ubicación de los pozos monitoreados.

Tabla VII.1. Ubicación de los pozos muestreados.

No.	Nombre del pozo	Fecha de monitoreo	Coordenadas UTM	
			X	Y
1	Atlixcayotl 9	22/02/2016	574493	2100045
2	Atlixcayotl 3	22/02/2016	576938	2101653
3	San Miguel Mayorazgo	22/02/2016	578567	2100429
4	La Victoria	22/02/2016	578370	2099866
5	Loma Bella	22/02/2016	580494	2099726
6	San Jorge	22/02/2016	582620	2099164
7	Héroes de Puebla	22/02/2016	585767	2103385
8	Parque Juárez	22/02/2016	583930	2104406
9	Prados agua azul	22/02/2016	582263	2103494
10	Recta Cholula Bomberos	23/02/2016	578319	2107549
11	Momoxpan 5	23/02/2016	576029	2107642
12	Carcaña 3	23/02/2016	575687	2108903
13	Carretas	23/02/2016	576430	2109138
14	CNIC	23/02/2016	579797	2105658
15	La Constancia	23/02/2016	580748	2111311
16	Sulfuroso 2 (CAPU)	23/02/2016	583315	2109422
17	CFE 2	23/02/2016	583927	2111657
18	Autopista	23/02/2016	585832	2110203
19	San Rafael 2	23/02/2016	589245	2106747
20	San Baltazar	23/02/2016	583486	2098513

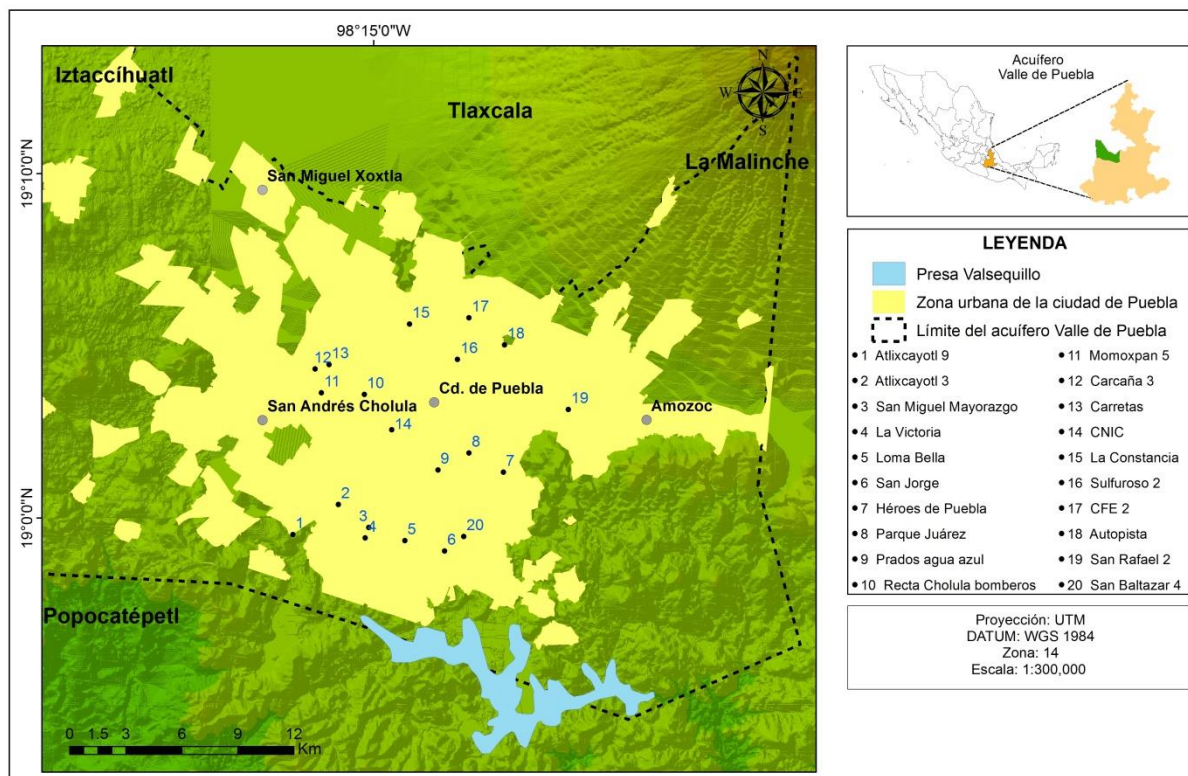


Figura VII.1 Ubicación de los pozos monitoreados en el mapa de la zona urbana de Puebla.

VII.4.2 Muestreo de pozos de abastecimiento público urbano en la ciudad de Puebla

El muestreo se realizó los días 22 y 23 de febrero del 2016. Para realizar el monitoreo se contó con las facilidades de acceso a los pozos de la empresa Concesiones Integrales Agua de Puebla que tiene a cargo la concesión para la prestación del servicio público de agua potable, drenaje, alcantarillado, saneamiento y disposición de aguas residuales en el municipio de Puebla.

Para el monitoreo de calidad del agua se consideró la medición de parámetros de campo y toma de muestra para el análisis en laboratorio de parámetros fisicoquímicos, cationes y aniones y microbiológicos (coliformes fecales), como se presentan en la Tabla VII.2. Las muestras de agua se recolectaron siguiendo los procedimientos expuestos en la norma NOM-230-SSA1-2002 Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo (DOF 2003).

Se tomaron dos muestras para el análisis de iones que se presentan en la Tabla VII.2. Una muestra para el análisis de aniones y otra para el análisis de cationes, la cual fue preservada con ácido nítrico hasta un pH menor o igual a 2, ambas muestras se filtraron con

una membrana de 0.45 micras y se refrigeraron hasta su análisis. Las muestras para el análisis microbiológico se recolectaron por duplicado en bolsas de plástico estériles y en este caso no se consideró la adición de tiosulfato de sodio por que la muestra se tomó antes del clorador.

En una botella de 125 ml se tomó cada muestra para el análisis de dureza total (CaCO_3) y se preservó con ácido nítrico hasta un pH menor o igual a 2. En una botella se tomó cada muestra para análisis fisicoquímicos que incluye alcalinidad total como CaCO_3 , sulfatos y sólidos disueltos totales. Todas las muestras fueron almacenadas en hielo (4°C) hasta el laboratorio y su posterior análisis. Los análisis de aniones y cationes se realizaron en el laboratorio de geoquímica de la Universidad Nacional Autónoma de México. Los análisis de dureza total, alcalinidad total, sulfatos, sólidos disueltos totales y microbiológicos se realizaron en el laboratorio de calidad del agua del Instituto Mexicano de Tecnología del agua.

Los equipos y las técnicas utilizadas para medir los parámetros de campo y los análisis en laboratorio se presentan en la Tabla VII.2.

Tabla VII.2. Parámetros fisicoquímicos evaluados en el monitoreo de pozos 2016.

Parámetros	Equipo/técnica
Campo	
pH	
Temperatura ($^\circ\text{C}$)	
Potencial redox (Eh)	Sonda multiparamétrica HANNA 9829
Conductividad eléctrica ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	
Oxígeno disuelto (mg/L)	
Sólidos disueltos totales (mg/L)	

Parámetros	Equipo/técnica
Laboratorio	
Aniones (mg/L): CO ₃ ²⁻ , F ⁻ , Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , Br ⁻ , PO ₄ ²⁻ HCO ₃ ⁻ y SO ₄ ²⁻	Cromatografía de Líquidos de alto desempeño (HPLC)
Cationes (mg/L): Al ³⁺ , As ³⁺ , As ⁵⁺ , Ba ²⁺ , Be ²⁺ , Bi ³⁺ , Bi ⁵⁺ , Ca ²⁺ , Cd ²⁺ , Co ²⁺ , Co ³⁺ , Cr ²⁺ , Cr ³⁺ , Cu ⁺ , Cu ²⁺ , Fe ²⁺ , Fe ³⁺ , K ⁺ , Li ⁺ , Mg ²⁺ , Mn ²⁺ , Mn ⁴⁺ , Na ⁺ , Ni ²⁺ , Ni ³⁺ , P ³⁺ , P ⁵⁺ , Pb ²⁺ , Pb ⁴⁺ , S ⁴⁺ , S ⁶⁺ , Se ⁴⁺ , Se ⁶⁺ , Si ⁴⁺ , Sr ²⁺ , y Zn ²⁺ .	Espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado por inducción (ICP-OES)
Dureza total como CaCO ₃ (mg/L)	NMX-AA-072-SCFI-2001
Alcalinidad total como CaCO ₃ (mg/L)	NMX-AA-036-SCFI-2001
Sulfatos (mg/L)	NMX-AA-074-SCFI-2014
Sólidos disueltos totales (mg/L)	NMX-AA-034-SCFI-2001
Microbiológicos -Coliformes fecales (NMP)	NMX-AA-042-1987

VII.5 Estudio Hidrogeoquímico y análisis de los datos históricos

Esta etapa de la investigación consistió en la utilización de herramientas de simulación para el análisis hidrogeoquímico, que incluye: la clasificación de las familias de agua, cálculo del índice de saturación para los minerales más importantes en los pozos muestreados del 2016, cálculo de la especiación de los iones mayoritarios, traza y metales pesados así como el cálculo de la fracción molar de cada una de las especies predominantes.

Los procesos de simulación hidrogeoquímica se llevaron a cabo con los programas Geochemist's Workbench 11.0 (Aqueous Solutions, 2016) y PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999).

VII.5.1 Cálculo del error

Como parte del análisis hidrogeoquímico y para dar veracidad a los datos químicos de los pozos muestreados, se realizó el cálculo del error de balance de cargas, que se calcula como se indica en la siguiente ecuación (Alley, 1993):

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

VII.5.2 Determinación de facies de agua.

Con la finalidad de caracterizar la composición química del agua subterránea de los pozos de abastecimiento público se identificaron las distintas familias de agua predominantes a través de diagramas de Stiff y Piper que se elaboraron con el programa de simulación hidrogeoquímica The Hydrochemist's WorkBench 11.0 (Aqueous Solutions, 2016).

VII.5.3 Cálculo del índice de saturación

Se calculó el índice de saturación para conocer los procesos de disolución-precipitación de los minerales presentes en el material geológico del acuífero profundo, con los datos de los años 2013 y 2016 para observar una tendencia o variación en los procesos geoquímicos de los minerales a través del tiempo.

VII.5.4 Especiación de metales pesados e iones mayoritarios

La especiación de los metales pesados se llevó a cabo con el programa PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999). El modelo hidrogeoquímico PHREEQC calcula la especiación de los elementos basados en la ley de acción de masas que establece que para una reacción química reversible en equilibrio a una temperatura constante, una relación determinada de concentraciones de reactivos y productos tiene un valor constante. La ley de acción de masas se aplica a las reacciones químicas para reportar cuantitativamente la concentración de productos de los reactantes en condiciones de equilibrio (Mott, 2014).

Es importante considerar la actividad Eh/pH de los pozos ya que las distintas especies de cada elemento se ven afectadas en su solubilidad y movilidad (Appelo y Postma, 2005).

Se calcularon las concentraciones molares de cada especie para metales pesados e iones mayoritarios; Además se realizaron diagramas de especiación considerando un rango de pH 0-14 en el eje X y la fracción molar de cada especie en el eje Y.

VII.5.5 Análisis estadístico multivariado: Cluster o análisis de conglomerados

Se aplicó el método de análisis multivariado con la técnica del análisis jerárquico de Cluster para identificar la similitud entre las muestras de aguas subterráneas de acuerdo a sus características hidrogeoquímicas.

Se utilizó el software STATISTICA-StatSoft (Quest Software Inc., 2016) para realizar el análisis. El estudio se aplicó al conjunto de 20 muestras de agua subterránea, se consideraron 17 parámetros hidrogeoquímicos como variables, que incluye: pH, iones

mayoritarios (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- y NO_3^-), iones minoritarios y elementos traza (Pb, B, Mn, Ba, Fe, F^- , Li y Sr).

No fue necesario realizar la estandarización de los datos debido a que la unidad de medida para todas las variables fue la misma (mg/L), excepto el pH.

El método utilizado para calcular la similitud entre cada par de objetos (muestras) fue el método de distancia Euclidiana. Para calcular la distancia de enlace entre Clusters se utilizó el método de Ward, que de acuerdo a Güler *et al.*, (2002) y Menció y Mas-Pla, (2008), ésta es una eficaz técnica de agrupamiento y tiene mínimos efectos de distorsión.

Los resultados del análisis de Cluster se presentaron mediante un dendrograma que es una representación gráfica en forma de árbol que resume el proceso de agrupación, donde los casos similares se conectan mediante enlaces cuya posición en el diagrama está determinada por el nivel de similitud/diferencia entre las muestras. Este tipo de representación permite apreciar claramente las relaciones de agrupación entre los datos e incluso entre grupos de ellos.

Se calculó el mínimo, máximo y la media de los grupos de Cluster obtenidos para observar la información estadística que compone cada grupo y así interpretar y clasificar las características fisicoquímicas de los grupos de acuerdo a su origen y evolución hidrogeoquímica.

VII.6 Estudio de calidad del agua y su variabilidad

Se realizó un análisis de variabilidad de la calidad del agua considerando los datos históricos recopilados de los años 2011, 2013 y resultados del monitoreo de 2016. Se consideraron los parámetros fisicoquímicos, iones mayoritarios, traza y metales pesados que incluye la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000) y los criterios de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2008) para observar la variación temporal en sus concentraciones.

El análisis de variabilidad histórica de calidad del agua se llevó a cabo con los diagramas de cajas y bigotes (Box & Whisker) que son una representación gráfica de valores estadísticos (mediana, percentil 25 y 75, valores máximos y mínimos) que permiten visualizar de una forma rápida ciertas características de un conjunto de datos: posición, dispersión simetría o asimetría (García *et al.*, 2006).

Además de la evaluación temporal de la calidad del agua, se realizó una evaluación espacial de los resultados de calidad del agua del muestreo 2016 con respecto a lo establecido por la NOM-127-SSA1-1994 y a los criterios de la OMS.

VII.7 Análisis de la composición química del agua con respecto al medio y origen

En esta etapa de la investigación se llevó a cabo el análisis e interpretación de los resultados de la caracterización química del agua integrando el estudio hidrogeoquímico, el análisis piezométrico y las condiciones del medio físico.

La representación gráfica de los datos hidroquímicos se hizo a través de distintos métodos que muestran la composición química del agua subterránea como los diagramas de columnas o barras de porcentaje molar, diagrama de Stiff, diagrama de Piper, diagramas Eh-pH y de estabilidad.

Se realizó la distribución espacial de la composición química del agua considerando la evolución piezométrica y las fallas y fracturas geológicas del sitio, a través de mapas para clasificar la distribución de los diferentes tipos de agua.

Se desarrolló un análisis de las posibles fuentes que dan origen a los metales pesados. Para considerar el origen natural se tomó en cuenta la geología del acuífero Valle de Puebla. Para evaluar las posibles fuentes antropogénicas se realizó un estudio de las zonas industriales ubicadas en la zona urbana de la ciudad de Puebla incluyendo los principales giros industriales (Tabla II.3) y la composición química de las aguas residuales industriales (Tabla VIII.13)

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

VIII.1 Búsqueda, análisis y revisión de la información

VIII.1.1 Fuentes de información

Se realizó el procesamiento y análisis de información de los pozos monitoreados en los años 2011, 2013, 2014 y 2016 (Tabla VIII.1).

Tabla VIII.1. Fuentes de información de los datos fisicoquímicos obtenidos en el año 2011, 2013, 2014 y 2016.

Datos	Fuente de información
2011	Los datos fisicoquímicos de los pozos se obtuvieron de la tesis de Salcedo Sánchez (2013) titulada “Modelo hidroeconómico basado en variables de calidad y cantidad para el apoyo en la toma de decisiones en el manejo de aguas subterráneas”, para esta tesis se realizó el muestreo el 9 de octubre 2011.
2013	El Sistema Operador de Agua Potable y Alcantarillado de Puebla (SOAPAP) brindó los datos fisicoquímicos del muestreo que realizaron en el año 2013.
2014	Los datos se obtuvieron del muestreo realizado el 18 y 19 de noviembre del 2014 como parte de la investigación postdoctoral titulada: “Modelación hidrogeoquímica para la evaluación de factores que influyen en el manejo óptimo del agua subterránea de la ciudad de Puebla” que realizó la Dra. Edith Salcedo Sánchez.
2016	Resultados del muestreo realizado el 22 y 23 de febrero del 2016 para la presente tesis de Maestría: “Impactos en la calidad del agua que abastece a la ciudad de Puebla por efecto de la explotación del acuífero” y para la continuación de la investigación posdoctoral de la Dra. Edith Salcedo Sánchez, y la Dra. Sofía Garrido Hoyos quienes asesoraron ambos proyectos.

VIII.2 Estudio piezométrico

Se interpolaron los datos del nivel del agua subterránea de los años 2002 y 2012 y se representaron las isopiezas en mapas para observar los niveles piezométricos dentro de la zona urbana de la ciudad de Puebla durante los años evaluados.

En la Figura VIII.1 se observa que los niveles del agua subterránea para el 2002 varían de 2040 m.s.n.m. en la zona sur oeste de la ciudad hasta 2280 m.s.n.m. en la zona cercana a la Malinche. Para el año 2012, se observa que el nivel más bajo del agua es de 2040 msnm y se extiende desde el sur hacia la zona centro de la ciudad (Figura VIII.2).

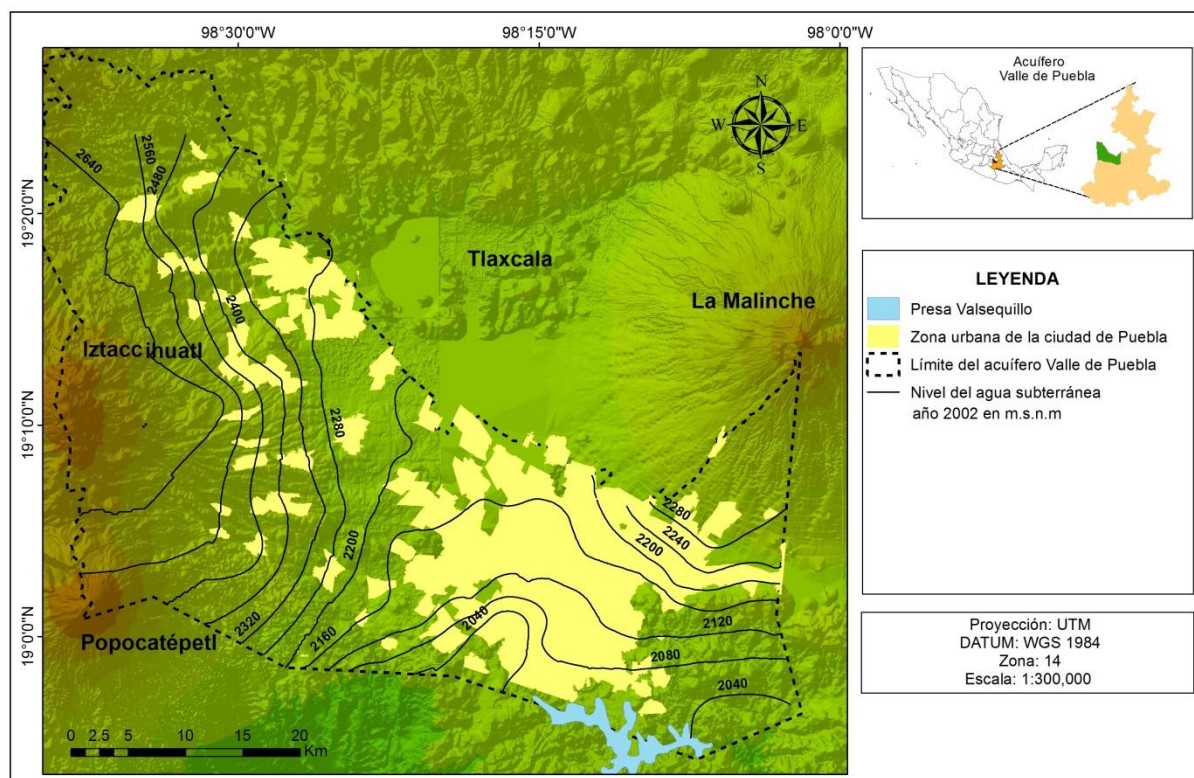


Figura VIII.1. Mapa de isopiezas en la zona urbana de Puebla del año 2002.

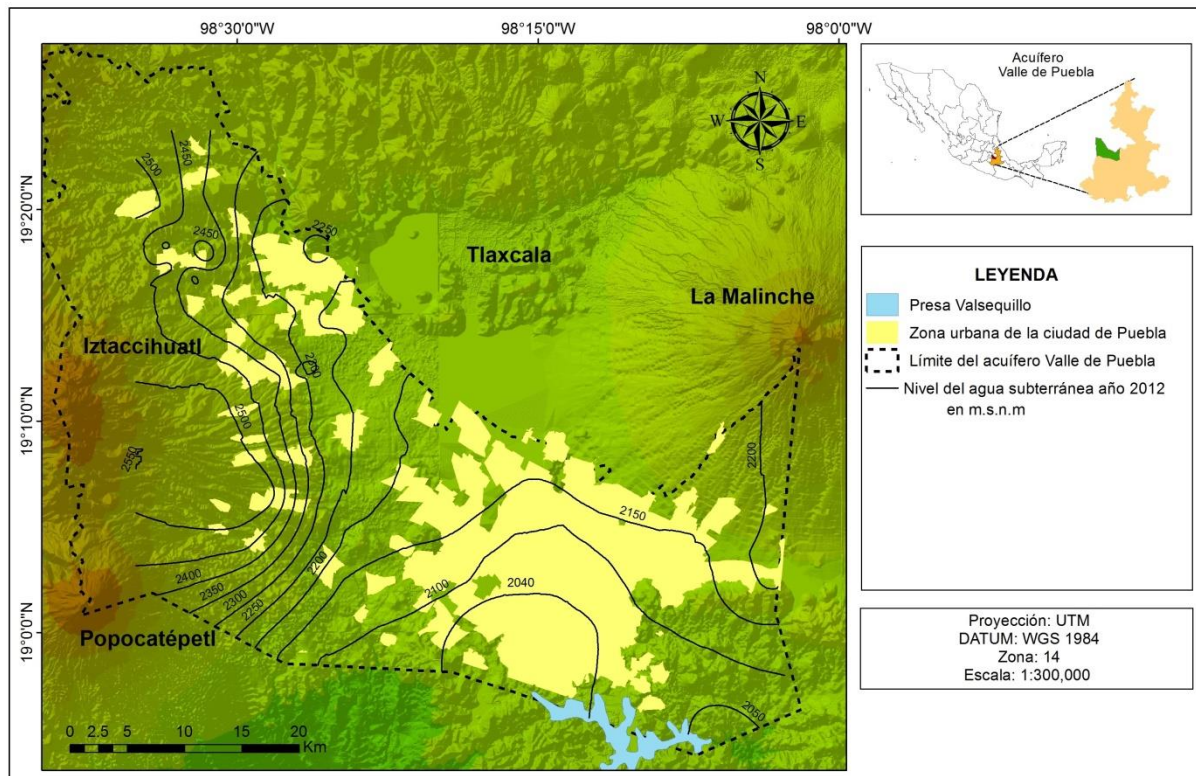


Figura VIII.2. Mapa de isopiezas en la zona urbana de Puebla del año 2012.

Del cálculo del abatimiento de los niveles de agua subterránea en el periodo 2002-2012, puede observarse que existen variaciones significativas en el comportamiento de los niveles piezométricos, como se muestra en la Figura VIII.3. Se muestra un cono de abatimiento de aproximadamente 20 metros que se genera específicamente en la zona centro de la ciudad de Puebla y se extiende hacia la zona noroeste. Este cambio en los niveles de agua se debe a la explotación intensiva de los pozos de abastecimiento público urbano e industrial que se ubican en el área urbana. También se observa un abatimiento de 5 y 2.5 metros que se extiende hacia la periferia de la ciudad. El abatimiento promedio por año es 2 (m/año) en la zona centro de la ciudad (Figura VIII.3).

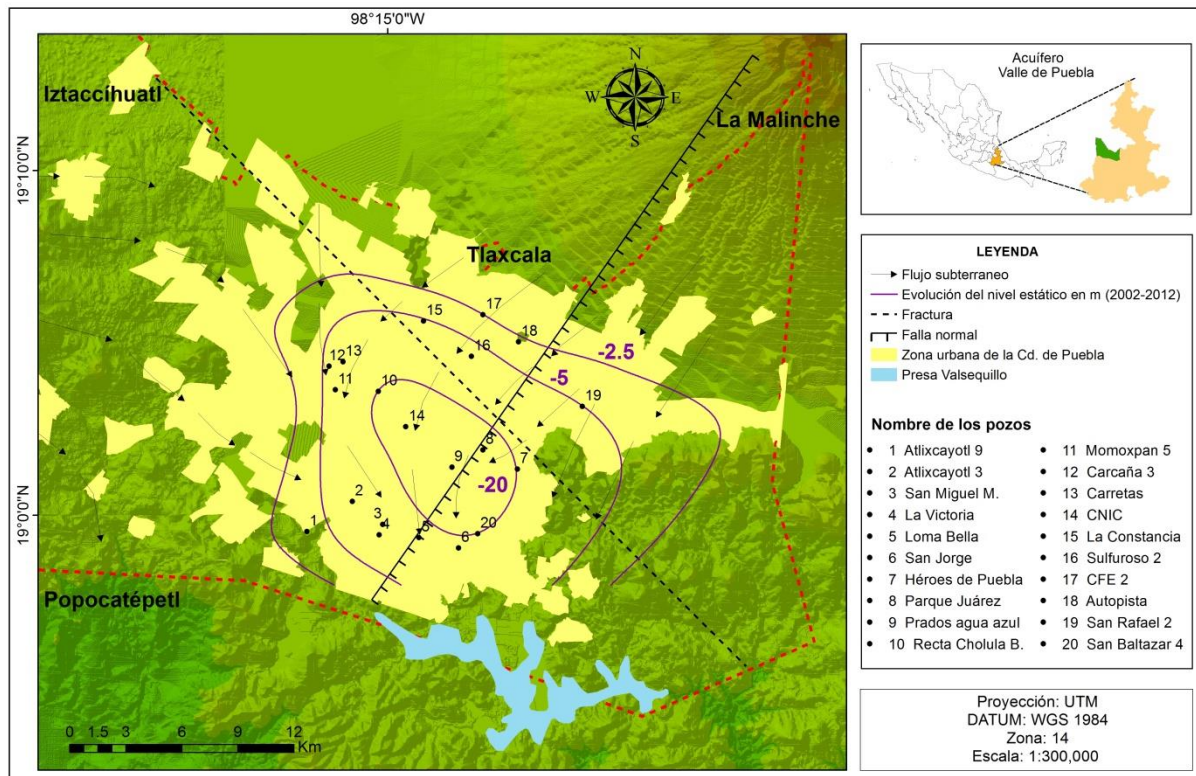


Figura VIII.3. Mapa de isodescensos del nivel del agua subterránea (2002 - 2012) en el acuífero Valle de Puebla.

VIII.3 Resultados de los análisis de laboratorio de 2016

En este apartado se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos. En la Tabla VIII.2 se presentan los resultados de los parámetros de campo como temperatura, conductividad, pH y Eh, además se incluyen los resultados del análisis de coliformes fecales (CF), sólidos disueltos totales (SDT) y dureza total en mg/L de CaCO₃.

Tabla VIII.2. Resultados fisicoquímicos de parámetros de campo y análisis de laboratorio, 2016.

No Pozo	Nombre de Pozo	Temp (°C)	pH	Eh (mv)	C. E (μS/cm)	SDT (mg/L)	CF (NMP/ 100 mL)	Dureza Total (mg/L)
1	Atlixcayotl 9	25	7.2	234	2082	722	<3	432
2	Atlixcayotl 3	25	7.1	221	1697	1126	<3	778
3	San Miguel Mayorazgo	22	7.3	570	1251	460	4	286
4	La Victoria	22	6.9	346	2556	964	<3	619
5	Loma Bella	21	7.3	282	2370	870	<3	568
6	San Jorge	20	7.2	281	2087	766	<3	531
7	Héroes de Puebla	20	7.7	247	1249	984	<3	645
8	Parque Juárez	21	7	291	2374	1187	<3	299
9	Prados Agua Azul	23	6.6	158	2194	1764	<3	1140
10	Recta Cholula bomberos	22	6.8	247	2110	1642	<3	1060
11	Momoxpan 5	26	6.6	236	2057	1395	9	974
12	Carcaña 3	27	6.6	272	1922	1312	<3	907
13	Carretas	25	7	216	1363	972	<3	543
14	CNIC	22	6.6	327	2240	1189	<3	1178
15	La Constancia	24	6.8	117	1379	1770	<3	768
16	Sulfuroso 2	30	6.3	285	2785	2948	<3	1894
17	CFE 2	26	7.7	115	289	280	<3	138
18	Autopista	20	7	184	432	416	<3	205
19	San Rafael 2	19	7.8	182	255	244	<3	119
20	San Baltazar	20	6.9	208	924	718	<3	476

En la Tabla VIII.3 se presentan los resultados del análisis de iones mayoritarios. En la Tabla VIII.4 y Tabla VIII.5 se muestran los resultados de los iones minoritarios y elementos traza que en su mayoría presentaron concentraciones por arriba del límite de detección.

Tabla VIII.3. Resultados del análisis de laboratorio de iones mayoritarios, datos 2016

No Pozo	Nombre de Pozo	Ca ²⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
1	Atlixcayotl 9	75.1	11	60.3	95.3	556	65	0.3	103.4
2	Atlixcayotl 3	173	18.8	82.2	111.9	889	51	1.4	101.1
3	San Miguel Mayorazgo	69.2	9.3	27	38.8	325	24.3	9.8	25.1
4	La Victoria	163.7	14.7	47.3	82.7	698	29.2	2.1	81.2
5	Loma Bella	151.5	17	45.9	67.9	593	41.6	12.3	110.4
6	San Jorge	165.2	8.5	25.8	48.1	462	48.7	17.4	104.1
7	Héroes de Puebla	92.9	7.2	14.8	27.1	400	36.1	28.6	66
8	Parque Juárez	201	9.9	29.6	40	241	47.5	58.8	317.6
9	Prados Agua Azul	299.1	15.5	81.1	90.7	754	134.2	10.9	546.9
10	Recta Cholula bomberos	259.6	23.5	101.3	113.3	832	78	1.8	492.7
11	Momoxpan 5	175.4	22	131.1	122.2	1121	57.5	2.6	113.2
12	Carcaña 3	149.6	22.2	124.1	109.6	1070	39.4	6.1	97.1
13	Carretas	121.1	20.8	48.6	118.8	687	48.1	36.7	201.3
14	CNIC	291.4	19.5	107	107.6	527	90.9	16.6	593.6
15	La Constancia	227.2	12	49.9	65	811	58.1	14.5	358.6
16	Sulfuroso 2	529.7	18.8	131.9	140.4	1023	157.2	35	1401
17	CFE 2	39.7	4.4	9.2	11.2	126	20	20.3	19.1
18	Autopista	48.2	6.9	20.9	16	134	24.4	63.7	66.7
19	San Rafael 2	35.2	3.6	7	12.8	128	5.8	11.9	14.9
20	San Baltazar	140.3	7.3	23.7	45.6	439	50.7	17	83.6

Tabla VIII.4. Resultados del análisis del laboratorio de elementos traça e iones minoritarios (parte 1), 2016.

No Pozo	Nombre de Pozo	Pb (mg/L)	B (mg/L)	Mn (mg/L)	Ba (mg/L)	Fe (mg/L)
1	Atlixcayotl 9	0.0241	0.9111	0.231	0.0765	0.0669
2	Atlixcayotl 3	0.0253	1.3631	0.3547	0.0987	0.0218
3	San Miguel Mayorazgo	0.0172	0.1208	0.0011	0.3539	<l.c.
4	La Victoria	0.018	1.1298	0.0846	0.0982	0.0228
5	Loma Bella	0.019	0.8498	0.0128	0.2298	0.0053
6	San Jorge	0.0146	0.4717	<l.c.	0.2097	0.004
7	Héroes de Puebla	0.0163	<l.c.	0.0011	0.3538	0.007
8	Parque Juárez	0.0176	0.5432	0.0006	0.0917	0.0101
9	Prados Agua Azul	0.0261	1.8863	0.0263	0.0301	0.0868
10	Recta Cholula bomberos	0.0221	1.6873	0.8633	0.0513	0.0086
11	Momoxpan 5	0.0261	1.2598	1.0755	0.1115	0.0522
12	Carcaña 3	0.024	1.0764	1.1314	0.0963	0.0115
13	Carretas	0.0241	0.9505	0.3783	0.1064	0.0281
14	CNIC	0.0272	1.788	0.5962	0.0701	0.0501
15	La Constancia	0.0213	1.0014	0.0363	0.0691	0.0285
16	Sulfuroso 2	0.0204	3.4084	0.0106	0.0288	0.0367
17	CFE 2	0.0254	<l.c.	<l.c.	0.0956	0.0042
18	Autopista	0.0319	<l.c.	0.0026	0.1519	0.0519
19	San Rafael 2	0.0221	<l.c.	<l.c.	0.2079	<l.c.
20	San Baltazar	0.0219	0.3117	0.0045	0.2716	0.0095

Tabla VIII.5. Resultados del análisis del laboratorio de elementos traza e iones minoritarios (parte 2), 2016.

No Pozo	Nombre de Pozo	F ⁻ (mg/L)	Zn (mg/L)	Li (mg/L)	Sr (mg/L)	Si (mg/L)
1	Atlixcayotl 9	0.3	0.0068	0.0958	0.8614	35.86
2	Atlixcayotl 3	0.3	<l.c.	0.2236	2.1334	37.64
3	San Miguel Mayorazgo	0.5	<l.c.	<l.c.	0.693	27.07
4	La Victoria	0.4	<l.c.	0.2007	1.9273	29.55
5	Loma Bella	0.3	<l.c.	0.1469	1.569	31.84
6	San Jorge	0.4	<l.c.	0.0744	1.0407	23.22
7	Héroes de Puebla	0.1	<l.c.	<l.c.	0.5617	28.01
8	Parque Juárez	0.3	<l.c.	0.0719	1.58	29.71
9	Prados Agua Azul	0.7	<l.c.	0.2375	3.3445	42.12
10	Recta Cholula bomberos	0.4	<l.c.	0.3143	2.9796	35.9
11	Momoxpan 5	0.3	<l.c.	0.3871	2.1144	41.89
12	Carcaña 3	0.5	<l.c.	0.3445	1.97	38.31
13	Carretas	0.4	<l.c.	0.2557	1.5362	36.4
14	CNIC	0.1	0.0071	0.2494	3.2324	34.72
15	La Constancia	0.3	0.0062	0.1457	2.0819	30.65
16	Sulfuroso 2	1.2	<l.c.	0.4273	5.9851	20.97
17	CFE 2	0.3	<l.c.	<l.c.	0.238	28.2
18	Autopista	0.2	0.006	<l.c.	0.3442	32.74
19	San Rafael 2	0.2	<l.c.	<l.c.	0.237	25.9
20	San Baltazar	0.3	<l.c.	0.0531	0.793	24.33

VIII.4 Estudio Hidrogeoquímico y análisis de los datos históricos

VIII.4.1 Cálculo del error (datos 2016)

En la Tabla VIII.6 se presentan los resultados del porcentaje de error del balance iónico. La mayoría de los pozos se encuentran dentro del rango de error aceptable ($\pm 10\%$) lo cual indica confiabilidad y verosimilitud en los datos obtenidos por el laboratorio de la campaña realizada en 2016, a excepción del pozo Héroes de Puebla que tiene un error de -13.22%.

Tabla VIII.6. Resultados del porcentaje de error del balance iónico de los pozos muestreados el 22 y 23 de febrero del 2016 en la Ciudad de Puebla

No Pozo	Nombre de Pozo	Cationes	Aniones	% error
1	Atlixcayotl 9	13.14	13.10	0.12
2	Atlixcayotl 3	20.74	18.14	6.70
3	San Miguel Mayorazgo	7.60	6.69	6.37
4	La Victoria	16.03	13.99	6.80
5	Loma Bella	14.72	13.39	4.75
6	San Jorge	12.67	11.39	5.32
7	Héroes de Puebla	7.21	9.41	-13.21
8	Parque Juárez	14.45	12.85	5.88
9	Prados agua azul	25.94	27.70	-3.28
10	Recta Cholula bomberos	26.82	26.12	1.32
11	Momoxpan 5	25.42	22.39	6.32
12	Carcaña 3	23.01	20.77	5.13
13	Carretas	15.74	17.40	-5.00
14	CNIC	28.52	23.82	8.98
15	La Constancia	18.58	22.63	-9.83
16	Sulfuroso 2 (CAPU)	43.87	50.92	-7.43
17	CFE 2	3.34	3.35	-0.26
18	Autopista	5.00	5.30	-2.91
19	San Rafael 2	2.98	2.77	3.80
20	San Baltazar	11.12	10.64	2.22

VIII.4.2 Determinación de familias de agua y concentraciones de iones mayoritarios

Para la interpretación de los datos de iones mayoritarios y la clasificación del agua se utilizaron diagramas hidroquímicos, en este caso se consideraron los diagramas de Piper y diagramas de Stiff. Se analizaron los datos de los años 2013, 2014 y 2016 y se graficaron en diagramas de Piper para identificar los facies hidrogeoquímicos existentes, evaluar la

química del agua con respecto a iones mayoritarios y la evolución hidrogeoquímica durante estos años.

La Figura VIII.4 muestra en el diagrama de Piper del año 2013 la existencia de tres familias de agua predominantes: bicarbonatada cálcica en siete pozos, bicarbonatada mixta en nueve pozos y sulfatada-cálcica en un pozo (pozo sulfuroso). Se observa que los pozos La Constancia, Prados Agua Azul y Parque Juárez se ubican cerca del límite de clasificación del agua tipo bicarbonatada y tienden a migrar hacia el agua sulfatada.

En la Figura VIII.5 se muestra la existencia de tres familias de agua en el año 2014: bicarbonatada mixta en nueve pozos, bicarbonatada cálcica en diez pozos y sulfatada cálcica en un pozo, igual que en el año 2013. Se observa la tendencia de un cambio de agua bicarbonatada a sulfatada en los pozos: La Constancia, Prados Agua Azul y Parque Juárez, lo que significa que al aumentar las concentraciones de sulfatos el tipo de agua migrará de bicarbonatada-cálcica a sulfatada-cálcica en estos tres pozos.

En la Figura VIII.6 se identificaron cuatro familias de agua predominantes para el 2016: bicarbonatada cálcica en ocho pozos, bicarbonatada mixta en ocho pozos, sulfatada cálcica se clasificaron dos pozos y una nueva clasificación se obtuvo, denominada mixta cálcica en dos pozos.

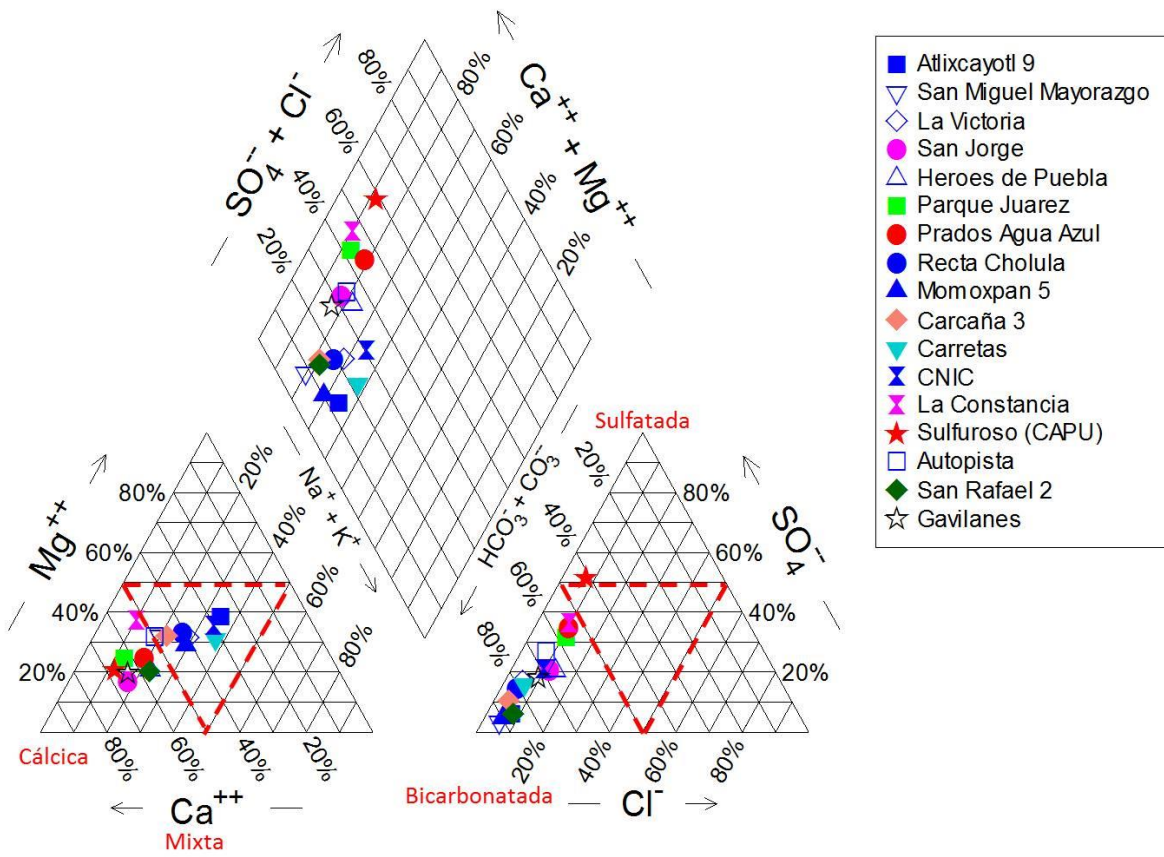


Figura VIII.4. Diagrama de Piper con datos del 2013.

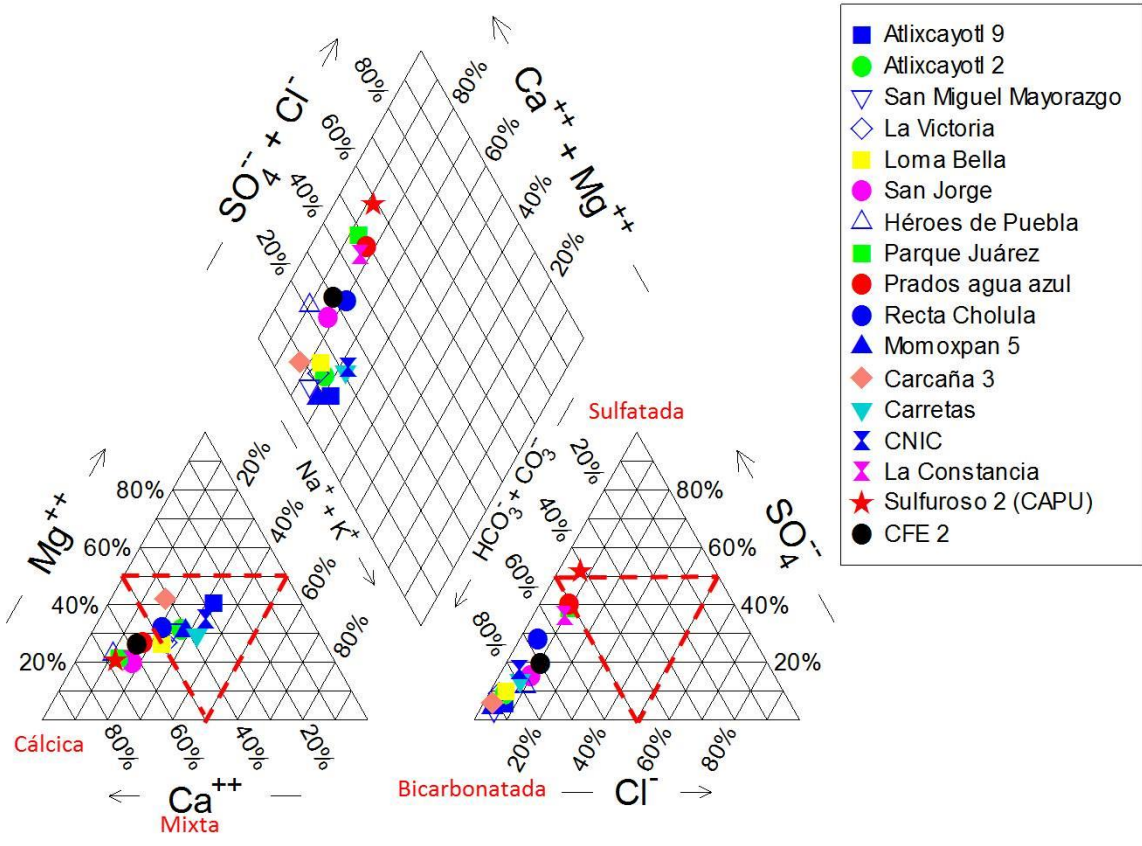


Figura VIII.5. Diagrama de Piper con datos 2014.

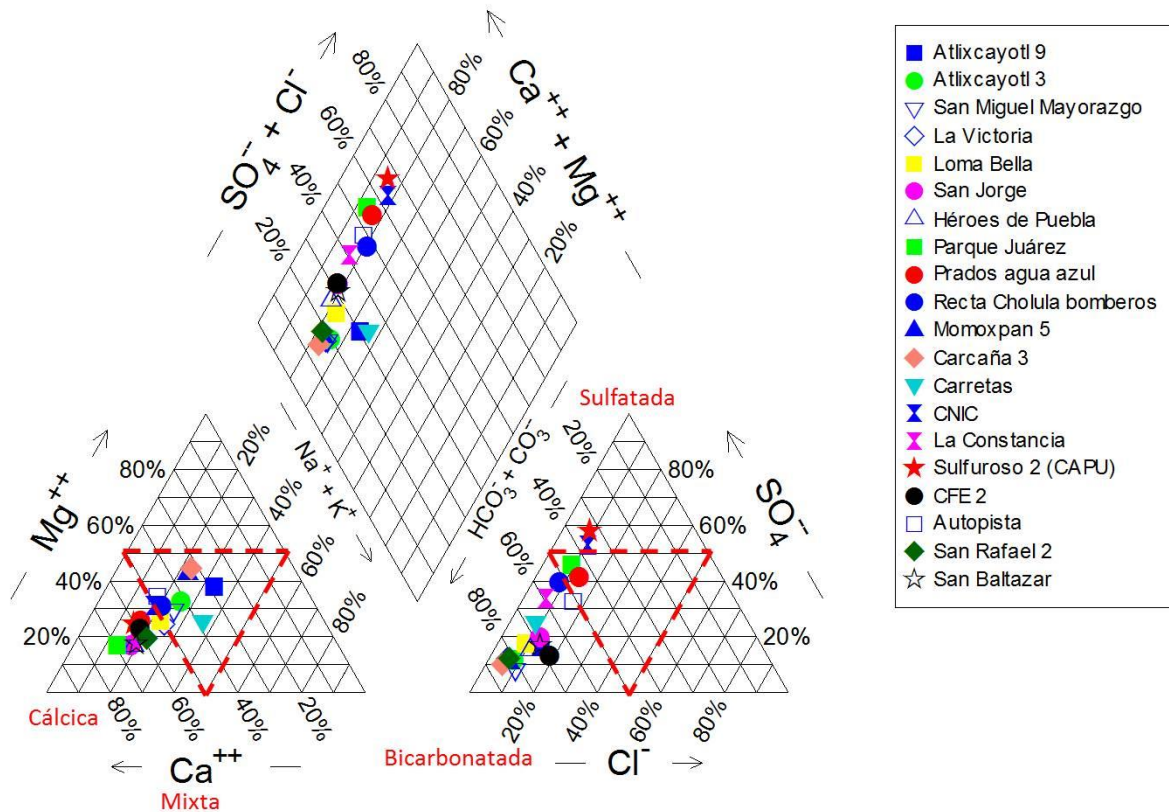


Figura VIII.6. Diagrama de Piper con datos 2016.

Al comparar las familias de agua de los pozos a través de los años, se muestra una evolución en la composición química y un cambio en la clasificación de familia de agua para los pozos: CNIC, Prados Agua Azul y Parque Juárez.

En los diagramas de Piper, se observa que la clasificación del tipo de agua para el pozo CNIC durante el 2013 y 2014 fue bicarbonatada mixta, con el muestreo del año 2016 se obtuvo que su tipo de agua migró a sulfatada cálcica por el aumento en la concentración de sulfatos.

En el análisis de la evolución química del pozo Prados Agua Azul se obtuvo que durante los años 2013 y 2014 presentaba agua tipo bicarbonatada cálcica y para el año 2016 el tipo de agua migró ligeramente hacia mixta-cálcica. La clasificación de aniones se define como mixta debido a que sus proporciones (carbonatos 44.89% y sulfatos 41.36%) son similares y todavía no se define como sulfatada.

El pozo Parque Juárez también cambió su composición de bicarbonatada cálcica en el 2014 a mixta-cálcica en el 2016 debido al incremento en la concentración de sulfatos de 60 mg/L.

Los pozos Autopista y Recta Cholula también presentan un aumento de sulfatos ya que se encuentran en el límite entre agua bicarbonatada a sulfatada.

Con el estudio hidrogeoquímico de Piper se logró identificar una evolución temporal de la química del agua en los pozos evaluados y se complementó el análisis utilizando diagramas de Stiff para observar la evolución espacial de los facies de agua dentro de la zona urbana de Puebla en el periodo del 2013 al 2016.

Al representar en un mapa los diagramas de Stiff correspondientes a cada pozo analizado durante los años 2013 y 2016 se puede identificar la distribución espacial de los patrones hidrogeoquímicos en la zona de estudio.

En la Figura VIII.7 se aprecian los cambios en la composición del agua subterránea que se manifiestan principalmente en la zona centro de la ciudad de Puebla.

En el año 2013 existía un pozo con agua sulfatada (pozo 16) y para el 2016 se registraron dos pozos (pozo 14 y 16). Además se obtuvo la presencia de dos pozos con agua mixta (pozo 8 y 9), esto puede deberse al ascenso de agua mineralizada que se ha regionalizado hacia el sur de la ciudad y ha ocasionado que los pozos aumenten sus concentraciones de calcio, magnesio y sulfatos. Por lo tanto, se observa claramente una migración de tipo de agua bicarbonatada a mixta y sulfatada conforme a lo descrito anteriormente en los diagramas de Piper y Stiff.

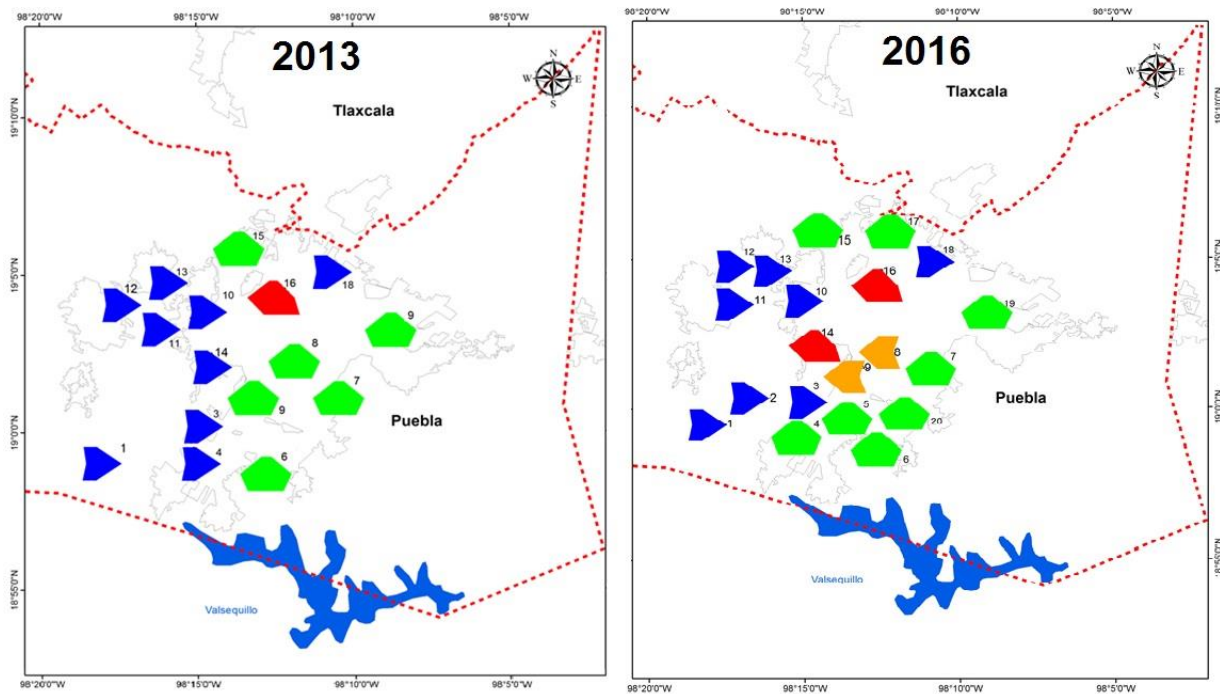


Figura VIII.7. Evolución espacial de la composición química del agua subterránea en la ciudad de Puebla.

VIII.4.3 Diagramas de estabilidad

Los diagramas Eh-pH grafican el potencial redox en función del pH de un compuesto químico y sus fases bajo condiciones termodinámicas estándar. Tiene en cuenta los equilibrios químicos y electroquímicos y define el dominio de estabilidad para el electrólito y los compuestos relacionados (Muñoz, 2013).

En este apartado se realizaron los diagramas de estabilidad con datos del 2013 y 2016 para identificar las formas iónicas del carbono y azufre en función del Eh y pH, debido a que estos iones representan entre el 60% y 75% del contenido total de iones disueltos en el agua subterránea de la zona de estudio.

Debido que los diagramas de estabilidad no consideran la fuerza iónica, se complementó la información con el análisis de especiación, tomando en cuenta los datos del año 2013 y los de 2016. Los nombres de los pozos y su color de identificación en los diagramas de estabilidad se presentan en la Tabla VIII.7.

Tabla VIII.7. Nombre de los pozos analizados con su de identificación en los diagramas Eh-pH.

	Atlixcayotl 9		CFE 2
	Atlixcayotl 3		Autopista
	San Miguel Mayorazgo		San Rafael 2
	Loma Bella		Héroes de Puebla
	Recta Cholula		La Victoria
	Momoxpan 5		Infonavit San Jorge
	Carretas		San Baltazar
	Carcaña 3		Parque Juárez
	La Constancia		Prados Agua Azul
	Sulfuroso (CAPU)		CNIC

En la Figura VIII.8 del diagrama de estabilidad del azufre se muestra que la especie predominante en todos los pozos y en ambos años son el ion sulfato (SO_4^{2-}). En la Figura VIII.9 del sistema de carbonatos, se observa que la forma iónica estable en la mayoría de los pozos y para ambos años es bicarbonatada (HCO_3^-); se observa un ligero cambio entre el 2013 y 2016 donde los pozos Sulfuroso, Momoxpan y la Carcaña migraron desde ácido carbónico (H_2CO_3) a bicarbonatos (HCO_3^-) debido al aumento de pH.

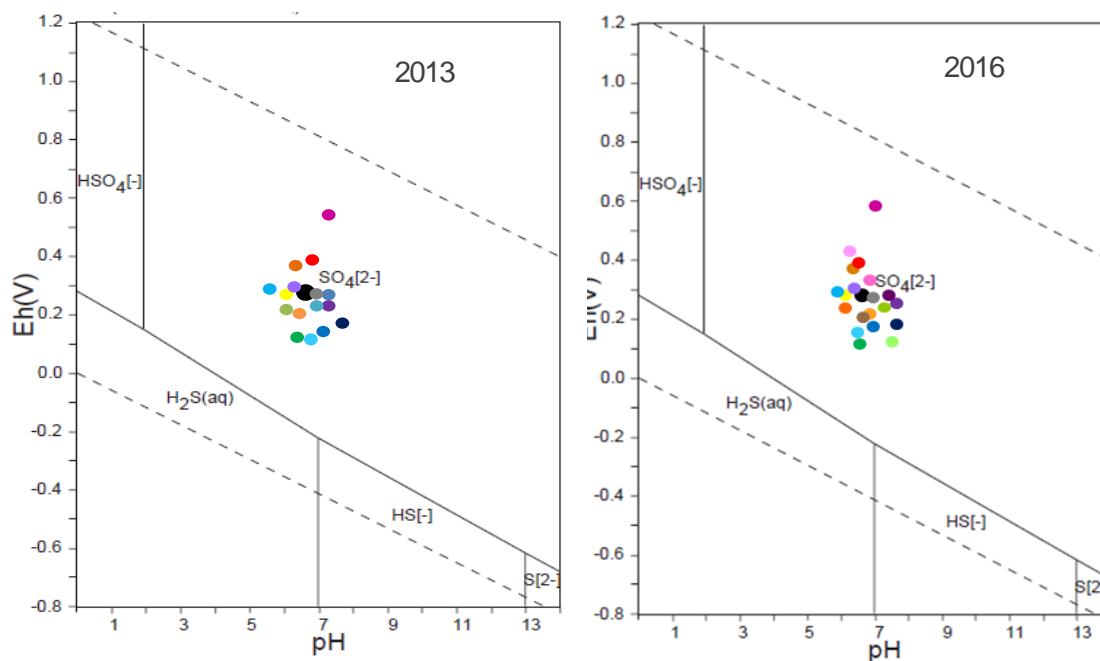


Figura VIII.8. Diagrama Eh-pH del azufre con datos del 2013 y 2016.

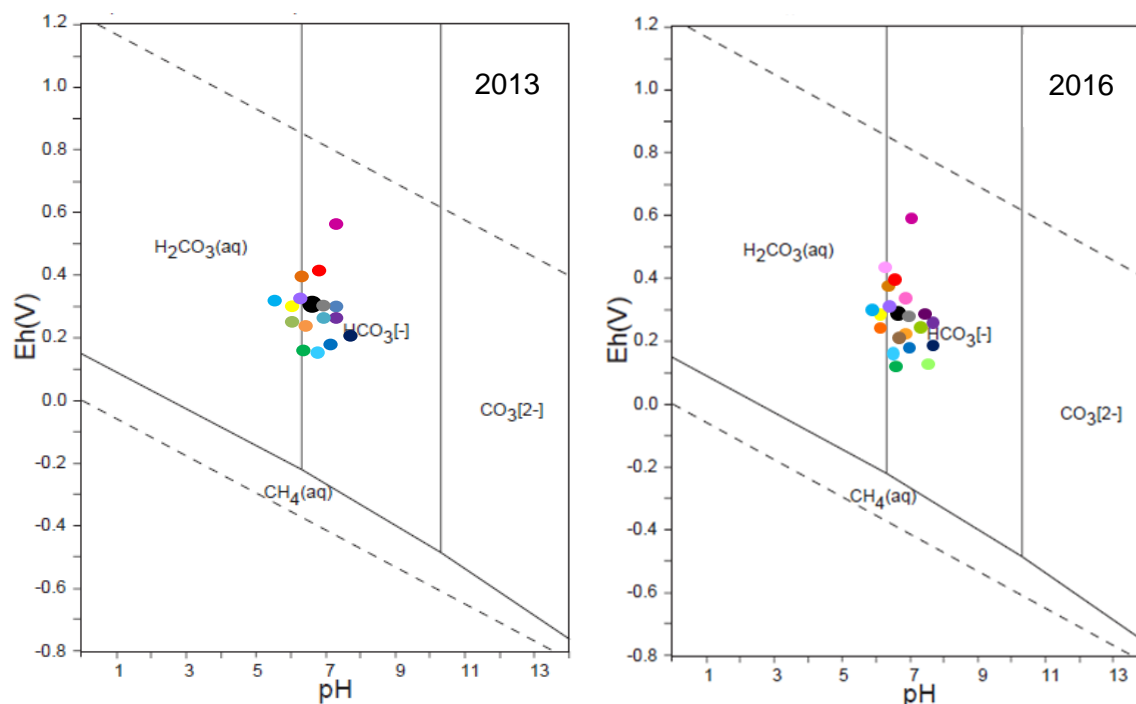


Figura VIII.9. Diagrama Eh-pH del sistema de carbonatos, datos 2013 y 2016.

VIII.4.4 Cálculo del índice de saturación

Los resultados obtenidos en el análisis de las familias de agua muestran que existe una evolución y tendencia al aumento de pozos con presencia de agua tipo sulfatada y mixta. De acuerdo a los antecedentes, las altas concentraciones de sulfatos, calcio, magnesio y sólidos disueltos totales pueden proceder de un flujo ascendente que viene desde el acuífero profundo. Por lo tanto surge la importancia de entender los procesos que ocurren en este acuífero y que dan origen al agua mineralizada.

Para conocer el proceso de disolución-precipitación de los minerales yeso, calcita y dolomita, presentes en el material geológico del acuífero profundo se calculó el índice de saturación. Se realizó el análisis con los datos de los años 2013 y 2016 para observar una tendencia o variación en los procesos geoquímicos de los minerales a través de los años.

Cuando el índice de saturación es negativo el agua está subsaturada con respecto al mineral (se disolverá), cuando es positivo el agua está sobresaturada (precipitará), y cuando los valores son cero el agua está en equilibrio con el mineral. En la Figura VIII.10 y Figura VIII.11 se muestra el índice de saturación calculado para calcita, dolomita y yeso con respecto a los sulfatos para los años 2013 y 2016 respectivamente.

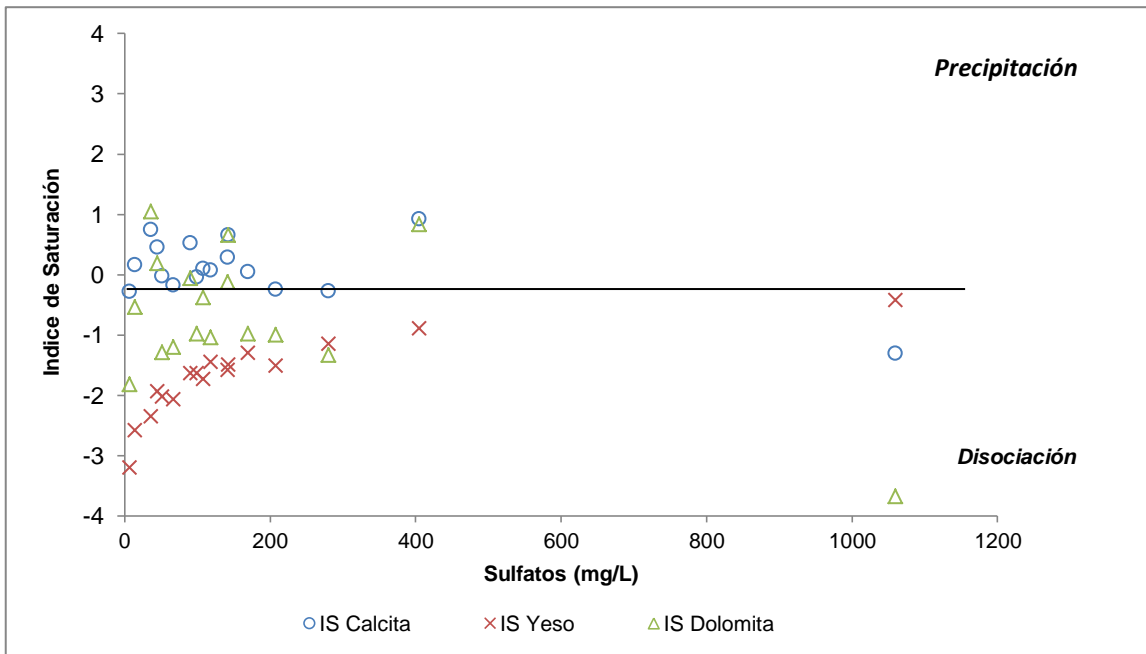


Figura VIII.10. Índice de saturación de yeso, calcita y dolomita con respecto a la concentración de sulfatos, datos 2013.

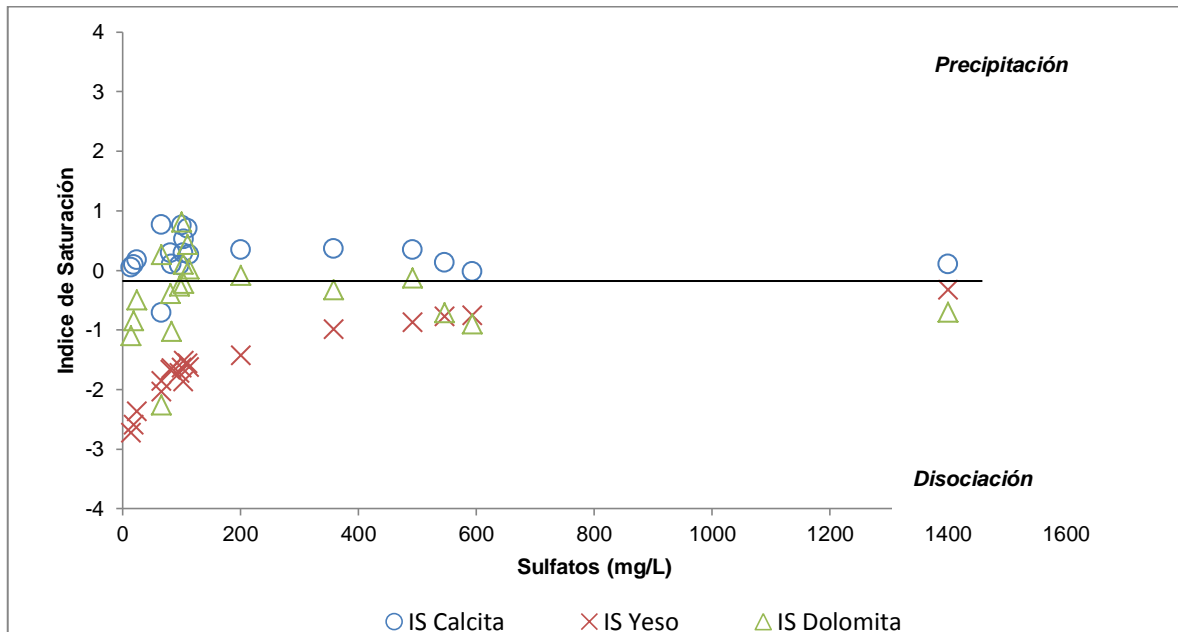


Figura VIII.11. Índice de saturación de yeso, calcita y dolomita con respecto a la concentración de sulfatos, datos 2016.

En ambas figuras se observa que en la mayoría de los pozos el índice de saturación con respecto a calcita es sobresaturado ($IS \geq 0.1$) y para el caso de dolomita y yeso la mayoría de los casos se encuentra en estado de subsaturación ($IS \leq -0.1$). Esto significa que el agua

del acuífero profundo del Valle de Puebla sigue la misma tendencia de disolver dolomita y yeso y de precipitar la calcita.

De acuerdo a los resultados del índice de saturación, el aumento en la concentración de Ca^{2+} debido a la disolución de yeso causa precipitación de la calcita, la concentración de CO_3^{2-} disminuye por la precipitación de la calcita, lo que provoca la disolución de dolomita y a su vez el aumento de la concentración de Mg^{2+} , el Ca^{2+} aumenta también debido a la relación entre estos. Por consiguiente, la disolución del yeso induce la transformación de dolomita a calcita en la roca y produce el agua mineralizada característica, con altas concentraciones de Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} a este fenómeno se le denomina dedolomitización (Appelo y Postma, 2005).

De acuerdo con Gárfias *et al.*, (2010), el aumento de las concentraciones de sulfatos, calcio y magnesio en el agua están asociados al fenómeno de dedolomitización que ocurre en el acuífero profundo y se está viendo reflejado en el acuífero superior.

El proceso de dedolomitización es el proceso inverso de la dolomitización, ocurre en acuíferos que contienen calizas, dolomía y lajas de yeso (Appelo and Postma, 2005). Consiste en el reemplazamiento de un mineral, generalmente dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ por calcita CaCO_3 . Este proceso ocurre cuando se presenta el equilibrio simultáneo del mineral calcita y dolomita, combinadas en disolución con yeso o anhidrita (CaSO_4), la cual induce a la transformación parcial o completa de la dolomita a calcita debido al aumento en la concentración de Ca^{2+} en el agua en combinación con la disolución de yeso provoca la precipitación de calcita por el efecto del ion común (Plummer *et al.*, 1990; Sacks y Tihansky, 1996).

Los pozos con bajo contenido de sulfatos, presentan un índice de saturación negativo con respecto a dolomita y yeso, por lo tanto en estos pozos se espera el incremento en las concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y SO_4^{2-} . A medida que el sulfato aumenta, las aguas se aproximan a la saturación de yeso y dolomita, esto ocurre principalmente en el pozo sulfuroso, por lo que se espera que al continuar el aumento en las concentraciones de sulfato, calcio y magnesio se sobrepase el equilibrio y se saturen con respecto a yeso y dolomita, ocasionando la precipitación de ambos minerales en un futuro cercano.

VIII.4.5 Especiación de iones mayoritarios y metales pesados

Se realizó la especiación de los iones mayoritarios que predominan en el agua subterránea de la zona de estudio Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- y SO_4^{2-} y de los metales pesados detectados como B, Ba, Pb y Mn con los datos del muestreo de 2016; utilizando el programa PHREEQC vs 3.1 y el software HYDRA-Medusa. Se consideró un modelo de especiación iónica formado por un conjunto de reacciones químicas y de especies principales en fase acuosa en distintas condiciones de pH.

El cálculo se realizó con el fin de mostrar el estado de oxidación en el que se encuentran en el medio e identificar si existe o pudiera existir algún riesgo a la salud por el tipo de metabolito que se pudiera llegar a formar y su biodisponibilidad con los cambios de pH (Jain y Ali, 2000; Isa *et al.*, 2014).

En las siguientes gráficas se muestra el porcentaje de la distribución de cada especie de los iones mayoritarios y metales pesados de cada pozo evaluado y los diagramas de especiación para identificar la fracción molar de las especies y su comportamiento con el cambio de pH.

En la Figura VIII.12 se muestra que la especie predominante del carbono para la mayoría de los pozos es el ion bicarbonato excepto en el pozo sulfuroso, el cual tiene altas concentraciones de CO_2 , esto se debe al bajo pH del agua en este pozo y la alta concentración de sulfatos que ha favorecido la disminución de los bicarbonatos.

Como se puede ver en la Figura VIII.13, si el pH cambiara, las concentraciones de ácido carbónico y bicarbonatos en el sitio también se verían afectadas. Conforme aumenta las concentraciones de carbonatos también aumenta el pH, ya que se hidroliza parcialmente el agua dando grupos OH^- al medio, lo que lo convierte en una base moderadamente fuerte; por lo contrario, si el pH disminuye, la presencia de ácido carbónico aumentaría.

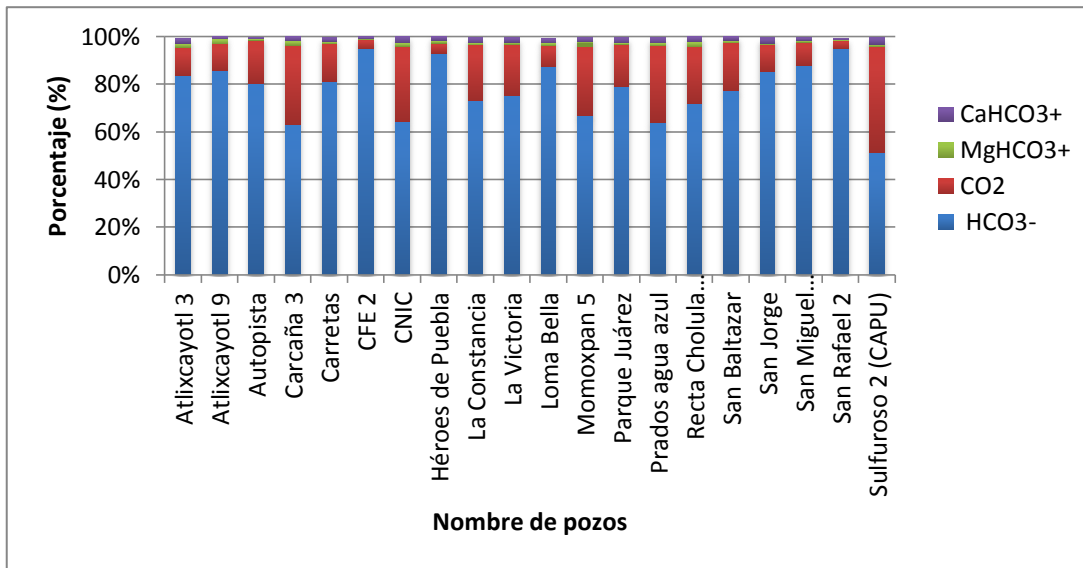


Figura VIII.12. Rango de porcentaje de las especies del carbono.

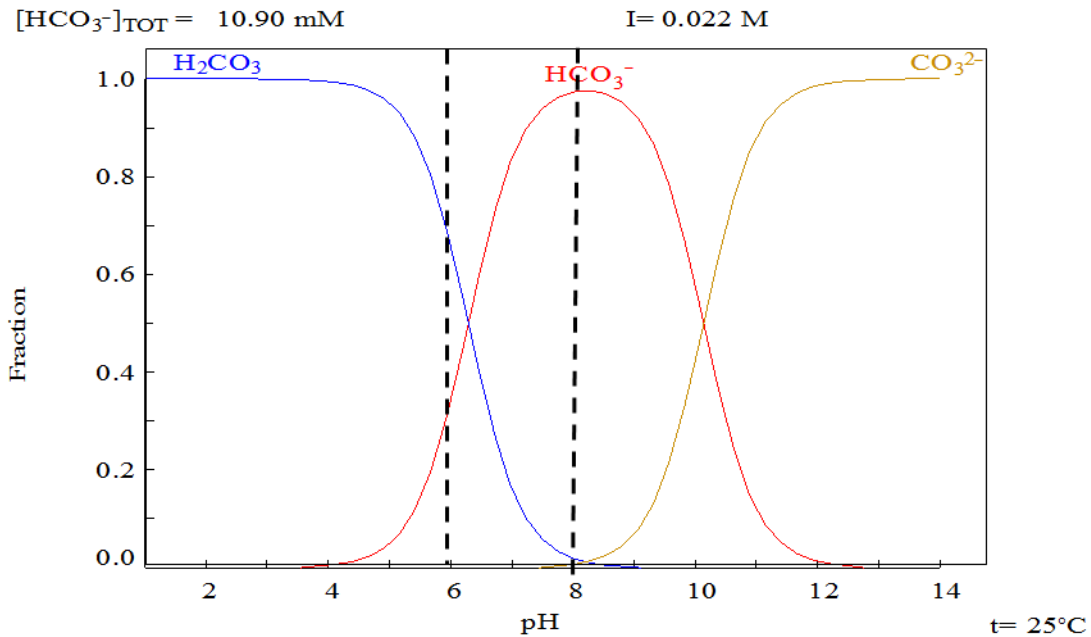


Figura VIII.13. Diagrama de la fracción molar de las especies del carbono.

De acuerdo a la Figura VIII.14, la principal especie del azufre en todos los pozos es el ion sulfato que abarca aproximadamente el 70% de la fracción molar. Se observa que forma los complejos estables con los cationes de calcio y magnesio, debido a que se presentan altas concentraciones de estos elementos. El sulfato de calcio y sulfato de magnesio representan entre el 10 y 20% de la fracción molar total. Conforme a lo descrito por Solans (1985), cuando los sulfatos son la especie predominante del azufre, se tiene un medio oxigenado y sólo a altas temperaturas se podría tener mayor presencia del ion HSO_4^- .

La variación en el rango del pH (6 a 8) no presentaría un cambio significativo en las especies. Como se observa en la Figura VIII.15 los sulfatos predominan en cualquier valor de pH.

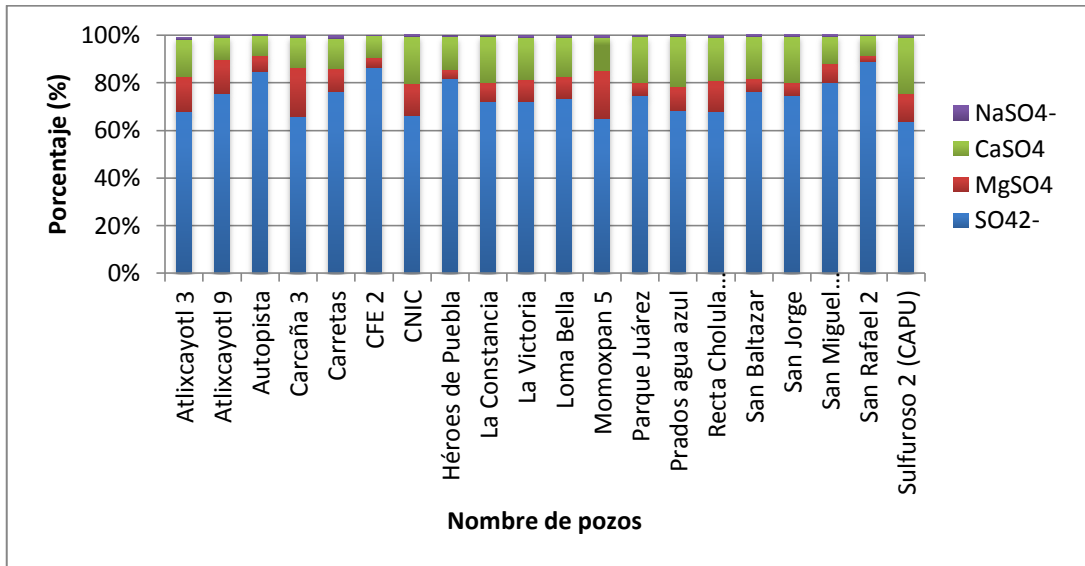


Figura VIII.14. Rango del porcentaje de las especies del azufre.

$$[\text{Ca}^{2+}]_{\text{TOT}} = 5.78 \text{ mM}$$

$$[\text{SO}_4^{2-}]_{\text{TOT}} = 4.11 \text{ mM}$$

$$I = 0.035 \text{ M}$$

$$[\text{Mg}^{2+}]_{\text{TOT}} = 3.42 \text{ mM}$$

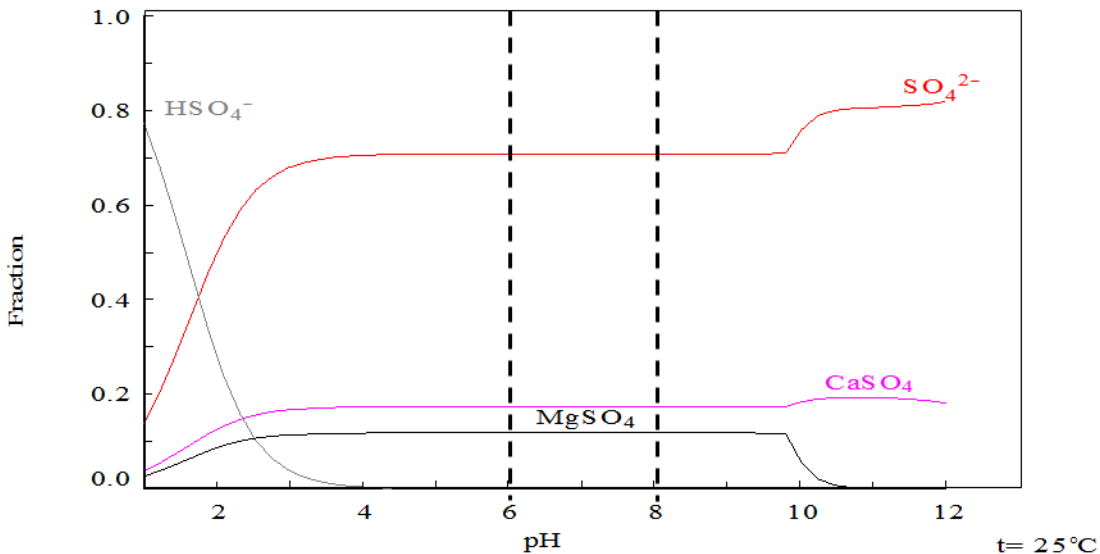


Figura VIII.15. Diagrama de la fracción molar de las especies del azufre.

Con respecto al calcio y magnesio se observa que en todos los pozos las especies dominantes son los iones calcio y magnesio respectivamente, seguido de los iones

bicarbonato de calcio y bicarbonato de magnesio, excepto en los pozos CNIC, La Constancia, Parque Juárez, Prados Agua Azul, Recta Cholula y el Sulfuroso, en los cuales la segunda especie dominante es sulfato de calcio y sulfato de magnesio respectivamente debido a las altas concentraciones de sulfatos que presentan estos pozos y a la estabilidad de estos complejos (Figura VIII.16 y Figura VIII.17).

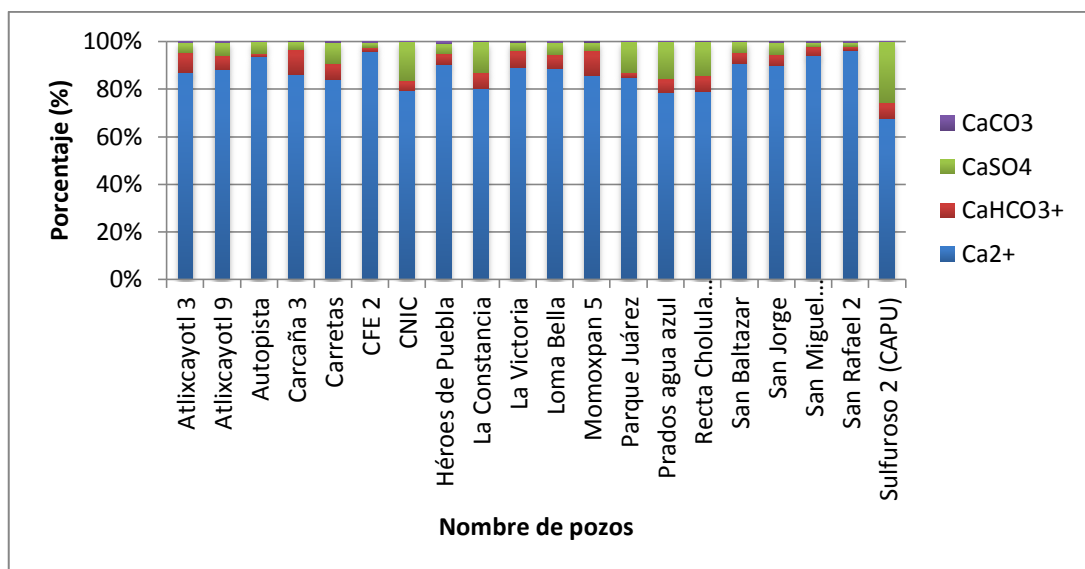


Figura VIII.16. Rango del porcentaje de las especies del calcio.

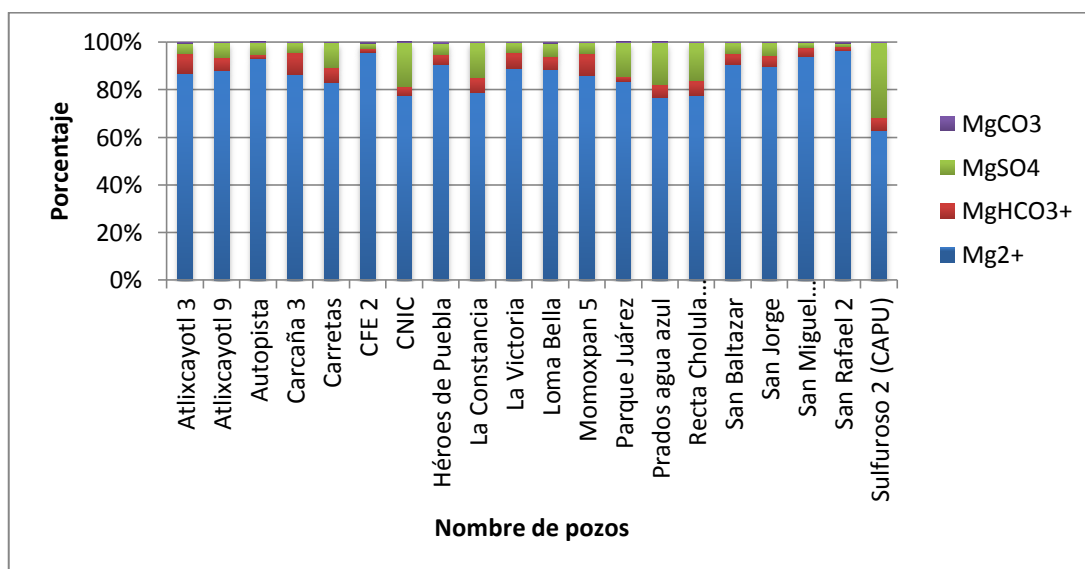


Figura VIII.17. Rango del porcentaje de las especies del magnesio.

Como se observa en la Figura VIII.18 y la Figura VIII.19 a medida que disminuye el pH aumenta la fracción molar de los iones Ca²⁺ y Mg²⁺, ya que se encuentran estables entre el rango de pH 0 - 8. Por el contrario si aumentara el pH los iones formarían complejos

carbonatados (carbonato de calcio y carbonato de magnesio), ambos en estado sólido, lo cual retira iones calcio y magnesio del medio, favoreciendo la disminución en sus concentraciones.

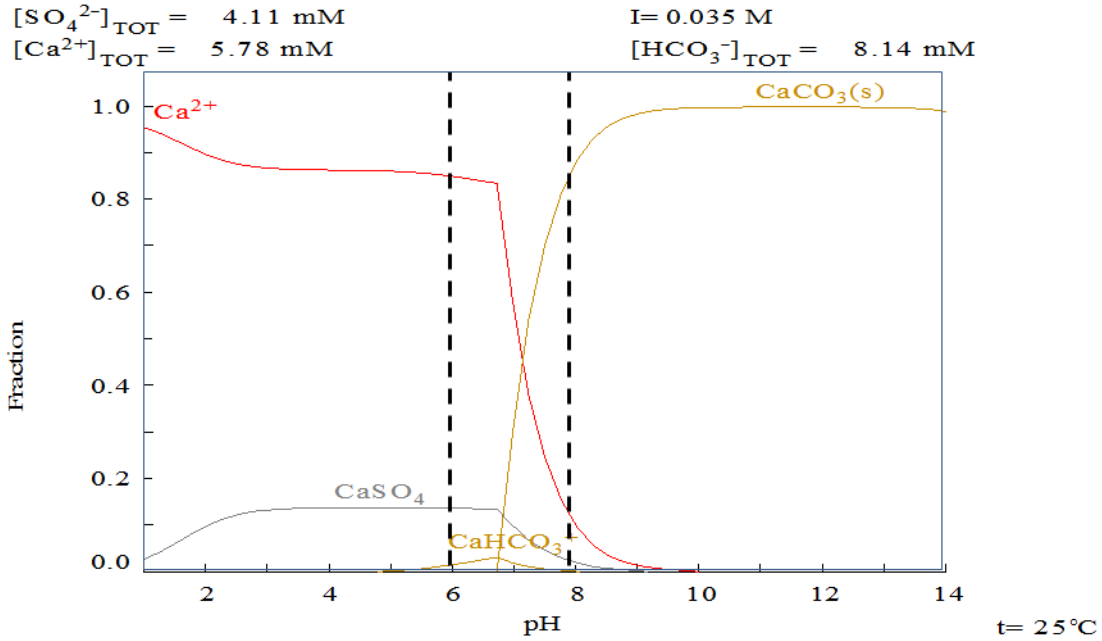


Figura VIII.18. Diagrama de la fracción molar de las especies del calcio.

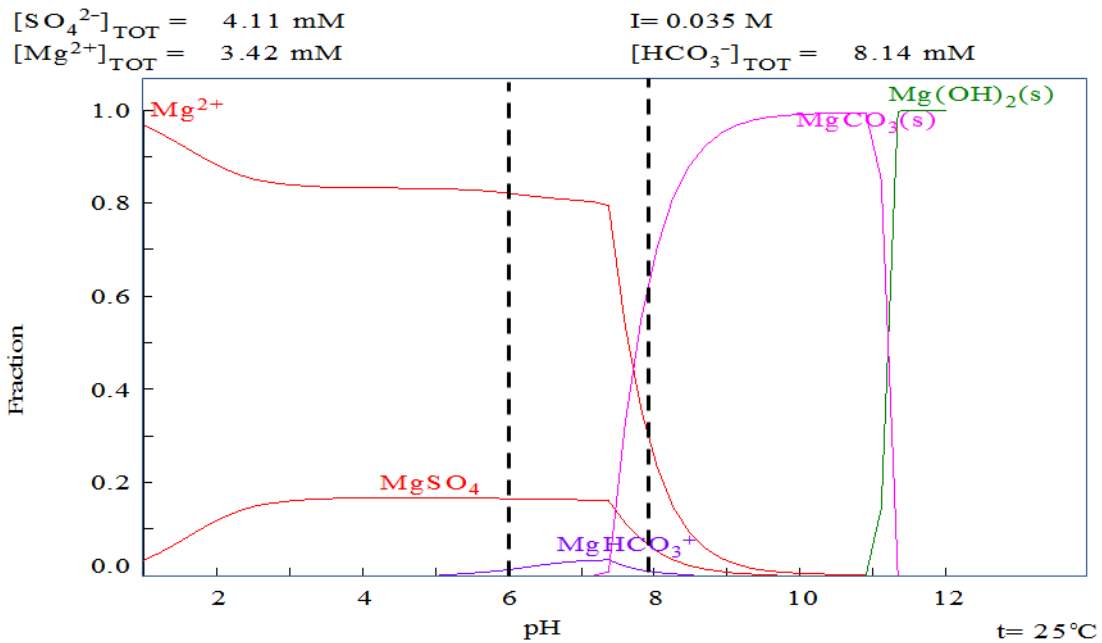


Figura VIII.19. Diagrama de la fracción molar de las especies del magnesio.

Con respecto al boro, solamente en 16 de los 20 pozos se detectó la presencia del boro. En la Figura VIII.20 se muestra que la especie dominante de boro en todos los pozos es la especie hidrolizada de ácido bórico con más 99% del porcentaje molar y el 1% lo representa el borato diácido. El ácido bórico es un ácido muy débil y no se disocia fácilmente, el valor de su primera constante de disociación es $10^{-9.24}$, por lo tanto predomina hasta un pH de 9.24 como se observa en la Figura VIII.21 y es la forma más probable en la mayoría del agua natural (WHO, 2003; Hem, 1992).

En la Figura VIII.21 se observa que al aumentar la concentración molar del borato diácido ($H_2BO_3^-$) también aumenta el pH, debido al aporte de grupos OH^- al sistema acuoso y disminuye la presencia del ácido bórico.

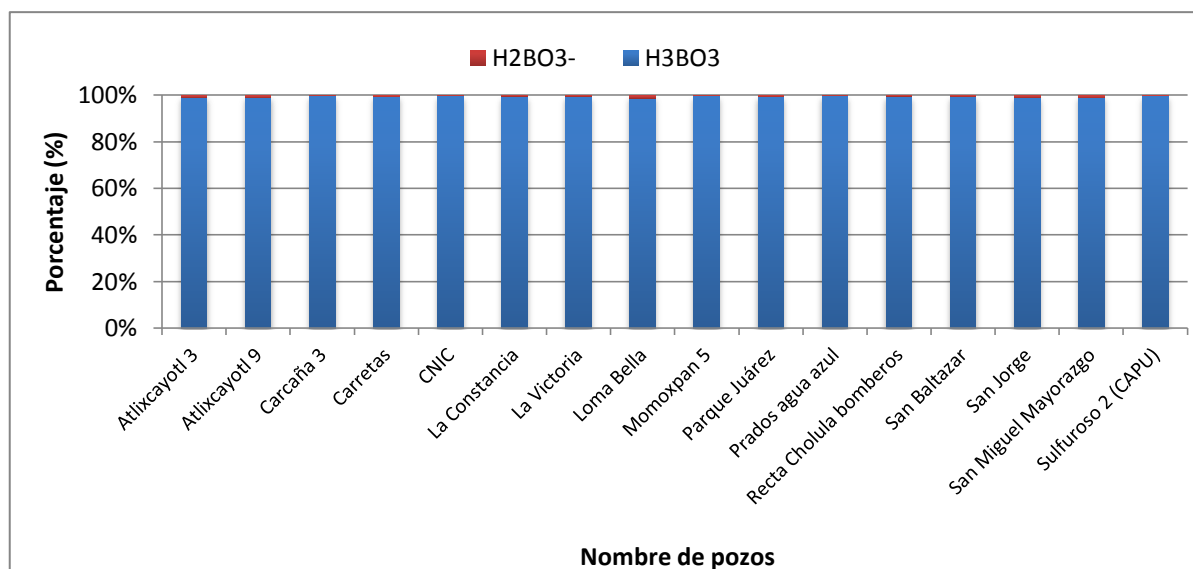


Figura VIII.20. Rango del porcentaje de las especies del boro.

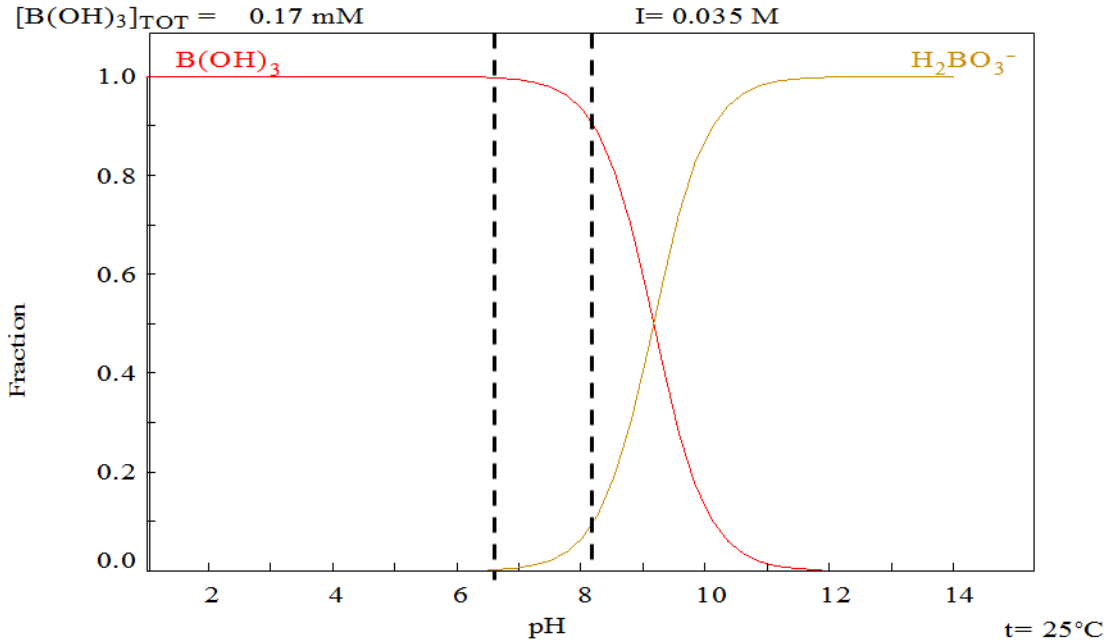


Figura VIII.21. Diagrama de las fracción molar de las especies del boro.

En la Figura VIII.22 se muestra que la especiación del plomo está definida de forma claramente mayoritaria por el carbonato de plomo; sin embargo, en la mayoría de los pozos el ion bicarbonato de plomo también presenta un alto porcentaje de especiación. De acuerdo a estudios previos (Hem, 1963) estas especies del plomo son las que predominan en un sistema alcalino. Se observa que en el pozo sulfuroso se tiene la presencia de sulfato de plomo. En todos los pozos se registra un porcentaje del ion Pb^{2+} menor del 10%.

De acuerdo a Navarro (2010), debido al alto contenido de carbonatos en el agua subterránea se producen procesos de neutralización que retardan el movimiento del plomo, originando las reacciones de adsorción, y precipitación-disolución que pueden inmovilizar temporalmente a este elemento, como es el caso del $PbCO_3$.

El rango de pH (6 a 8) presenta mayor tendencia a condiciones alcalinas por lo que abundan las especies de carbonato de plomo y bicarbonato de plomo; los sistemas con alta alcalinidad pueden mantener el plomo disuelto en concentraciones menores a 0.05 mg/L y la absorción de plomo en superficies y sedimentos orgánicos e inorgánicos mantiene una baja concentración de plomo disuelto en los niveles de agua subterránea (Hem, 1992).

Como se muestra en la Figura VIII.23, si el valor de pH disminuye, la especie presente sería el ion plomo, que tendría mayor movilidad y biodisponibilidad; a su vez, también disminuirían las especies carbonatadas. Por el contrario, al aumentar el pH, el Pb^{2+} que se incorpora al

medio puede precipitar rápidamente como carbonato de plomo (cerusita) y formar especies con carbonatos o hidróxidos como son $\text{Pb}(\text{CO}_3)_2^{2-}$ y $\text{Pb}(\text{OH})_3^-$.

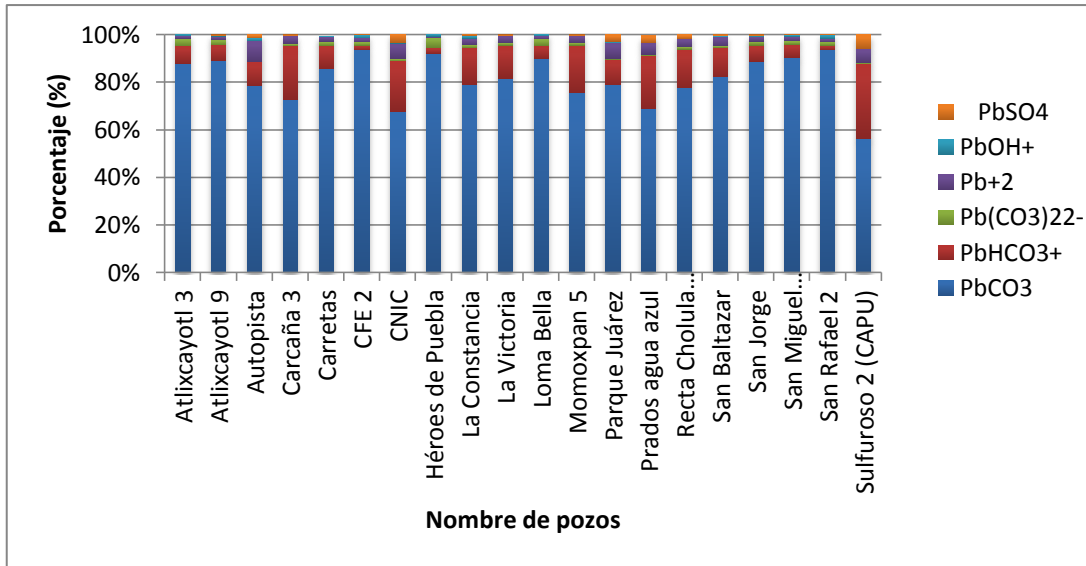


Figura VIII.22. Rango del porcentaje de las especies del plomo.

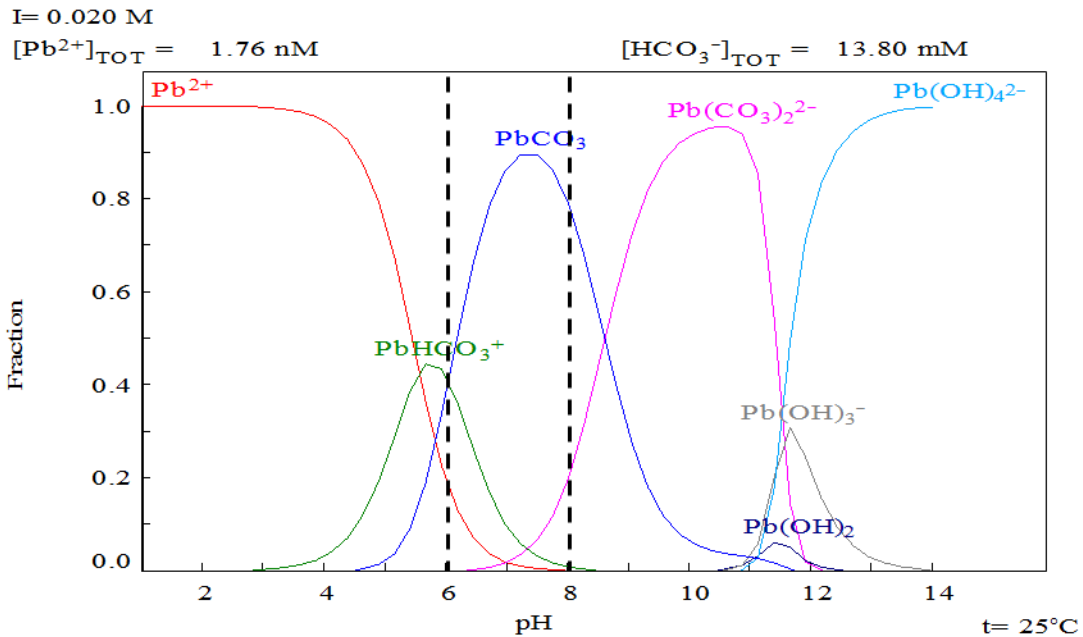


Figura VIII.23. Diagrama de la fracción molar de las especies del plomo.

En la Figura VIII.24 se puede observar el porcentaje de especiación del manganeso en 12 de los 20 pozos donde se detectó la presencia de este elemento. Las especies predominantes de manganeso para todos los casos son el ion Mn^{2+} y MnHCO_3^+ . También se

encuentra presente el complejo sulfato de manganeso y carbonato de manganeso en un rango del 3 al 20%. El manganeso tiene alta movilidad y su solubilidad está determinada por la actividad pH-Eh (Isa *et al.*, 2014).

De acuerdo a Ruíz (2017), el catión Mn^{2+} (manganeso) es la forma soluble más importante de manganeso en la naturaleza, ocupando una gran porción del régimen Eh-pH asociado con las aguas naturales. La razón por la que existe mayor estabilidad del Mn^{2+} , con respecto al Mn^{4+} , en un rango de pH ácido a neutro como se observa Figura VIII.25 se debe al débil efecto que tienen los electrones en el subnivel 3d5 de la configuración electrónica, generando una mayor atracción por parte del núcleo y otorgándole una mayor estabilidad, de este modo el Mn^{2+} no será afectado por iones tales como hidróxidos e hidruros.

Como se muestra en la Figura VIII.25, si el valor del pH disminuye, las especies estables que se presentarían son el ion manganeso y el sulfato de manganeso; si el pH es mayor que 8 se presentarían las especies de carbonato de manganeso y se presentaría hidróxido $Mn(OH)_2$ y éste se oxida con mucha facilidad aún en el aire.

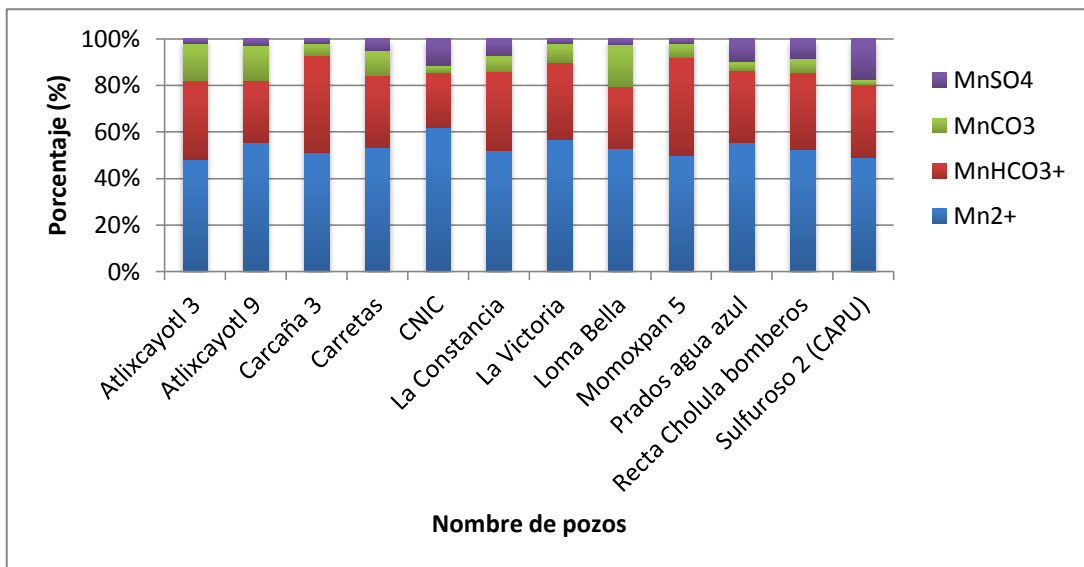


Figura VIII.24. Rango del porcentaje de las especies del manganeso.

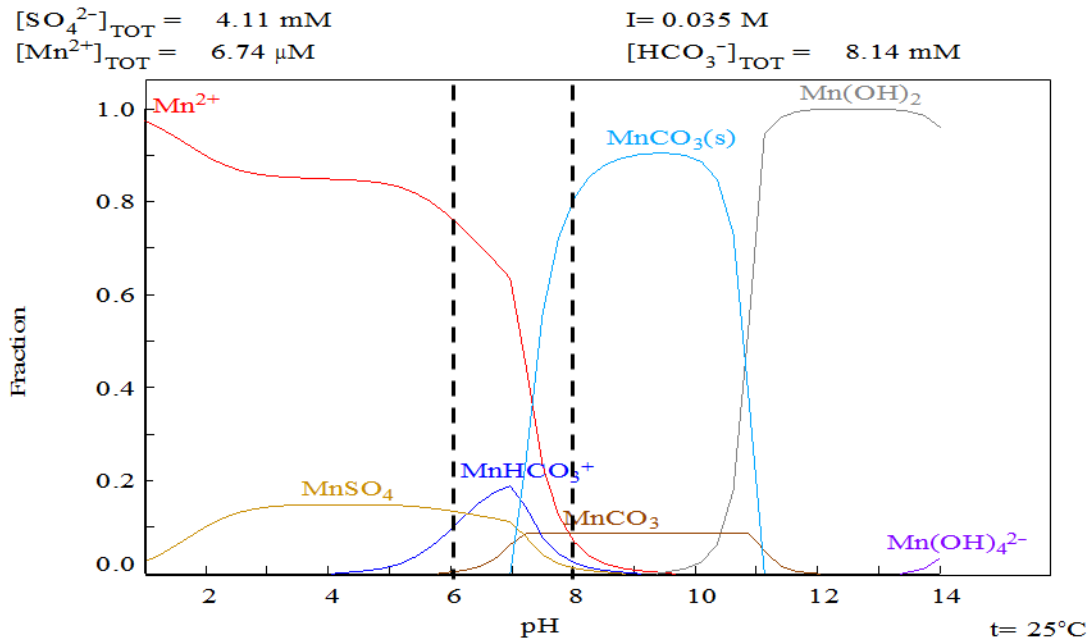


Figura VIII.25. Diagrama de la fracción molar de las especies del manganeso.

VIII.5 Resultados del análisis estadístico multivariado: Cluster o Análisis de conglomerados

Se realizó el estudio estadístico multivariado de Cluster para identificar la relación entre muestras a través de las similitudes de datos hidroquímicos y corroborar los resultados obtenidos en el presente trabajo.

De acuerdo a los resultados, se obtuvo la presencia de agua mineralizada en los pozos ubicados en la zona de mayor abatimiento, esto se ha evidenciado en la evolución en las familias de agua. Por otra parte, se hallaron pozos con alto contenido de plomo, boro, y manganeso, posiblemente contaminados por la mezcla con agua del flujo superficial o por origen natural. Por último se encontraron pozos con agua característica de buena calidad.

Con el análisis de Cluster se presentó de manera estadística y gráfica la agrupación entre estos pozos de acuerdo a la similitud en sus características hidroquímicas y se corroboró la clasificación del agua subterránea en grupos de acuerdo a su origen y evolución hidrogeoquímica.

De acuerdo al análisis estadístico de Cluster se obtuvo un dendrograma donde se identificaron 5 grupos de muestras de agua como se observa en la Figura VIII.26. Posteriormente, se llevó a cabo una interpretación espacial de los grupos de Cluster para identificar las cinco agrupaciones en la zona urbana de Puebla como se muestra en la Figura VIII.27. Para complementar el analizar de la composición química de cada grupo de

Cluster e identificar las principales diferencias y similitudes entre agrupaciones, se presentan los valores promedio de iones mayoritarios y minoritarios en la Tabla VIII.8 y Tabla VIII.9.

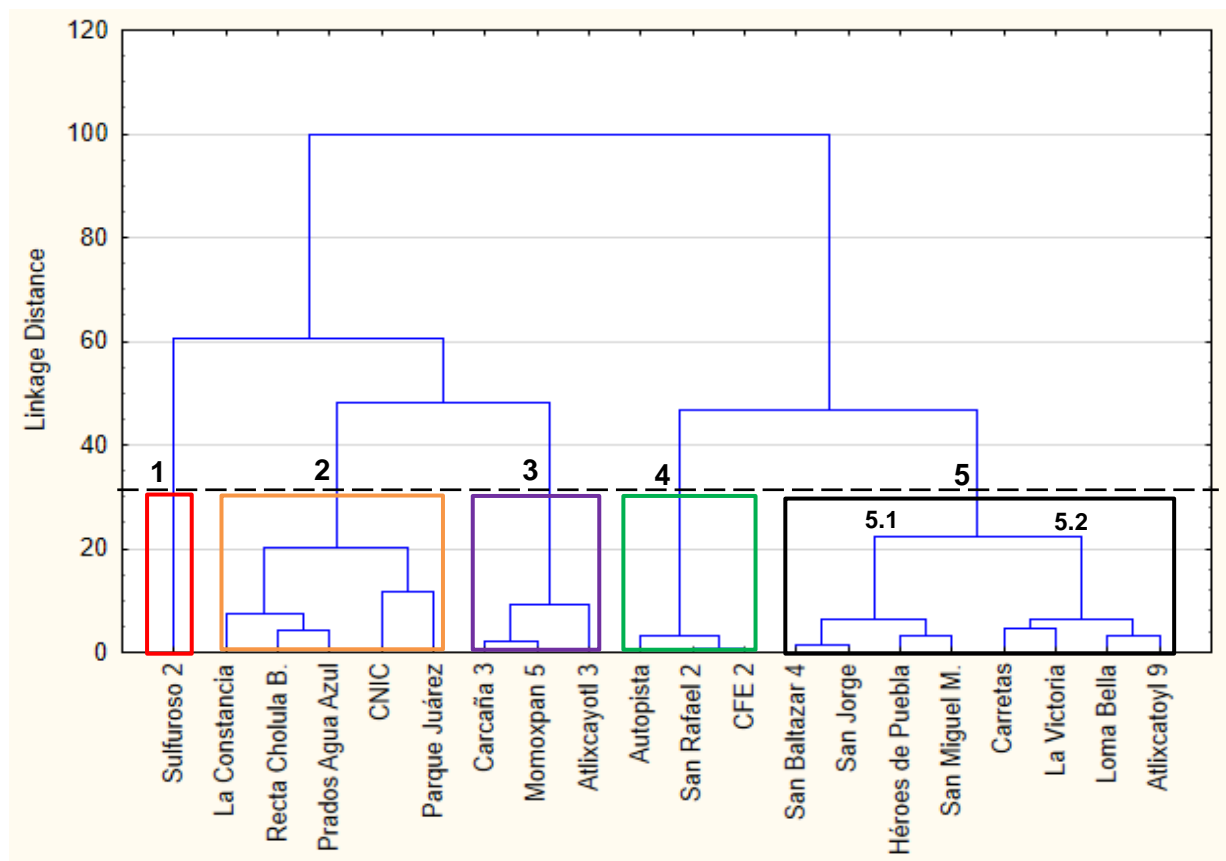


Figura VIII.26. Dendrograma del análisis de Cluster.

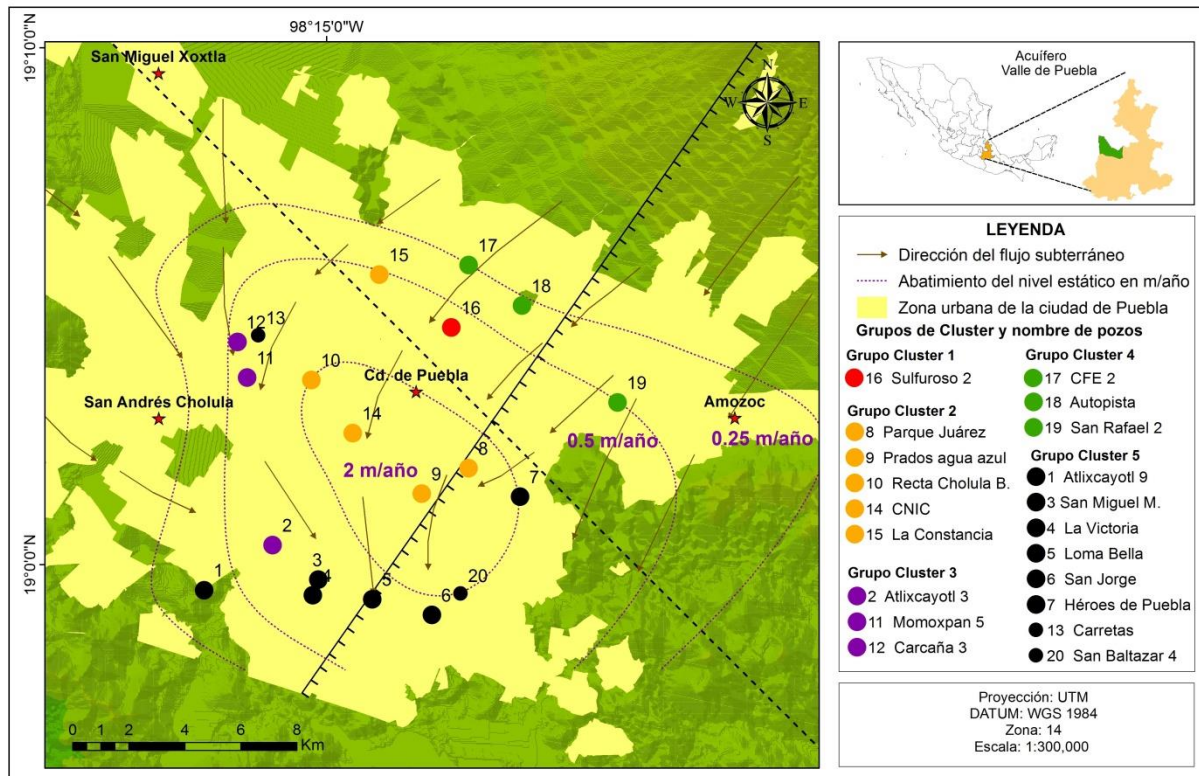


Figura VIII.27. Distribución espacial de las familias de Cluster.

Tabla VIII.8. Valores promedio de iones mayoritarios de los grupos de Cluster.

Grupo	Pozos	pH	Ca ²⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Na ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L
1	Sulfuroso	6.3	529.67	131.90	140.39	18.84	1023.00	1401.00	157.18	35.02
2	La constancia Recta Cholula Prados Agua Azul CNIC Parque Juárez	6.76	255.65	73.77	83.31	16.06	633.00	461.87	81.73	20.54
3	Carcaña 3 Momoxpan 5 Atlixcayotl 3	6.77	165.97	112.47	114.59	21.01	1026.67	103.79	49.31	3.33
4	Autopista San Rafael 2 CFE 2	7.50	41.02	12.38	13.36	4.98	129.33	33.57	16.75	31.99
5	San Baltazar 4 San Jorge Héroes de Puebla San Miguel M. Carretas La Victoria Loma Bella Atlixcayotl 9	7.19	122.36	36.68	65.54	11.98	520.00	96.90	42.96	15.53

Tabla VIII.9 Valores promedio de iones minoritarios de los grupos de Cluster.

Grupo	Pozos	Pb mg/L	B mg/L	Mn mg/L	Ba mg/L	Fe mg/L	F- mg/L	Li mg/L	Sr mg/L
1	Sulfuroso	0.020	3.41	0.01	0.03	0.04	1.21	0.43	5.99
2	La constancia Recta Cholula Prados Agua Azul CNIC Parque Juárez	0.023	1.38	0.3	0.06	0.04	0.34	0.2	2.64
3	Carcaña 3 Momoxpan 5 Atlixcayotl 3	0.025	1.23	0.85	0.1	0.03	0.37	0.32	2.07
4	Autopista San Rafael 2 CFE 2	0.027	0	0.0008	0.15	0.02	0.26	0	0.27
5	San Baltazar 4 San Jorge Héroes de Puebla San Miguel M. Carretas La Victoria Loma Bella Atlixcayotl 9	0.019	0.59	0.09	0.21	0.02	0.33	0.1	1.12

El grupo de Cluster 1, representado por el pozo sulfuroso tiene el mayor contenido de sulfatos, calcio y magnesio; y altas concentraciones de boro y estroncio. Su importancia resalta que se ubica en la zona de mayor abatimiento y la fractura geológica, como se presenta en la Figura VIII.27 y sus características indican que el origen de su mineralización proviene del acuífero profundo.

El grupo de Cluster 2 está conformado por los pozos: La Constancia, Recta Cholula, Prados Agua Azul, CNIC y Parque Juárez señalados de color naranja en la Figura VIII.27. Estos pozos también presentan alto contenido de sulfatos y calcio; del mismo modo se ubican dentro de la zona con el de mayor abatimiento (2 m/año) y fallas geológicas. Sus características químicas denotan dentro del análisis, la migración de agua carbonatada a sulfatada, así como la mezcla de agua mineralizada del acuífero profundo y el agua de reciente infiltración ya que su composición es proporcional de un agua mixta.

El grupo de Cluster 3 se caracteriza por su composición química como agua de reciente infiltración, con alta calidad. Presenta la mayor concentración de bicarbonatos y manganeso. Incluye los pozos Carcaña, Momoxpan y Atlixcayotl 3 simbolizados de color morado en la Figura VIII.27 y como se observa se localizan en el oeste en la línea del flujo subterráneo proveniente de la zona de recarga y en el sur de la ciudad.

El grupo de Cluster 4 se identifica por incluir los pozos con el menor contenido de iones mayoritarios, boro y litio; sin embargo, presenta las más altas concentraciones de plomo. Su composición química indica un origen proveniente del acuífero superior y posiblemente contaminado con plomo debido a la industria. Incluye los pozos Autopista, San Rafael 2 y CFE 2 marcados de color verde en la Figura VIII.27 y como se muestra en dicha figura, los pozos se localizan en la zona norte de la ciudad, cerca del área industrial.

El grupo de Cluster 5 incluye los pozos de menor contenido de boro y plomo y baja concentraciones de iones mayoritarios. Sus características químicas muestran que también es de reciente infiltración. Incluye los pozos: San Baltazar 4, San Jorge, Héroes de Puebla, San Miguel Mayorazgo, Carretas, La Victoria, Loma Bella y Atlixcayotl 9, localizados en el sur y hacia el oeste de la ciudad de Puebla, como se muestra en la Figura VIII.27 se representan por los puntos de color negro.

VIII.6 Estudio de la calidad del agua y su variabilidad

VIII.6.1 Evaluación de calidad del agua del monitoreo del 22 y 23 de febrero de 2016

Se llevó a cabo la evaluación de calidad del agua de los resultados del muestreo 2016 conforme a los límites máximos permisibles de la norma NOM-SSA-127-1994 y los criterios establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2008).

En la Tabla VIII.10, Tabla VIII.11 y Tabla VIII.12 se presentan los valores máximos, mínimos y promedios de los parámetros fisicoquímicos, iones mayoritarios y elementos minoritarios respectivamente para los veinte pozos evaluados con los criterios de calidad nacionales e internacionales. Se resaltan los valores que sobrepasan el límite máximo permisible establecido por los criterios de calidad del agua.

También se presenta la evaluación espacial de la calidad del agua a través de mapas de zonificación, considerando los principales parámetros conforme a los criterios anteriormente mencionados.

Tabla VIII.10. Evaluación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos con respecto a los criterios de calidad del agua (datos 2016).

	Temp (°C)	pH	SDT (mg/L)	CF (NMP/ 100 mL)	Dureza Total (mg/L)
NOM-127-SSA1-1994	-	6.5 - 8.5	1000	Ausencia	500
OMS-2008	-	6.5 - 8.5	1000	Ausencia	100
Media	23	7.0	1086	6.5	678
Mínimo	19	6.3	244	4	119
Máximo	30	7.8	2948	9	1894
Desv. Est.	3	0.4	629	4	431
No. pozos que no cumplen LMP	-	1	9	2	Nom: 13 OMS: 20

Tabla VIII.11. Evaluación de los iones mayoritarios con respecto a los criterios de calidad del agua (datos 2016).

	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
NOM-127-SSA1-1994	-	-	200	250	44.5	400
OMS-2008	75	30	200	250	50	250
Media	170	58	73	55	18	245
Mínimo	35	7	11	6	0.3	15
Máximo	530	132	140	157	64	1401
Desv. Est.	115	42	41	37	18	326
No. pozos que no cumplen LMP	16	12	0	0	2	Nom: 4 OMS: 6

Tabla VIII.12. Evaluación de metales pesados y elementos traza totales con respecto a los criterios de calidad (datos 2016).

	Pb (mg/L)	B (mg/L)	Mn (mg/L)	Ba (mg/L)	Fe (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	Zn (mg/L)
NOM-127-SSA1-1994	0.025	-	0.15	0.7	0.3	1.5	5
OMS-2008	0.01	0.3	0.4	0.7	0.3	1.5	3
Media	0.02	1.17	0.28	0.14	0.03	0.37	0.01
Mínimo	0.01	0.12	0.00	0.03	0	0.06	0.01
Máximo	0.03	3.41	1.13	0.35	0.09	1.21	0.01
Desv. Est.	0.004	0.78	0.40	0.1	0.02	0.24	0.001
No. pozos que no cumplen LMP	Nom: 6 OMS: 20	15	Nom: 7 OMS: 7	0	0	0	0

Como se puede observar en la Tabla VIII.10, Tabla VIII.11 y Tabla VIII.12 de acuerdo al análisis de calidad del agua del 2016 se obtuvo que los parámetros que no cumplen con los límites de la norma y los criterios de la OMS 2008 son: SDT, coliformes fecales, dureza total, iones mayoritarios (calcio, magnesio, sulfatos, nitratos) y metales pesados (plomo, boro y manganeso).

En el caso del pH solamente un pozo no cumple con la normatividad establecida y es considerado como ligeramente ácido; sin embargo la mayoría de los pozos presentan un valor de pH neutro entre el rango 6.3–7.8.

Para la evaluación espacial de calidad del agua sólo se consideraron aquellos iones mayoritarios y minoritarios que sobrepasan los límites máximos permisibles de la norma mexicana y para los criterios de la OMS.

Con respecto a los iones mayoritarios, en la Figura VIII.28, Figura VIII.29, Figura VIII.30 y Figura VIII.31, se observa la distribución espacial de calcio, magnesio y sulfatos. Los pozos que sobrepasan los criterios para agua de consumo humano para estos parámetros se ubican en la ciudad (pozos 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 15 y 16) y que quedan en la línea de fallas y fracturas geológicas por las cuales puede ascender el agua mineralizada almacenada a mayor profundidad.

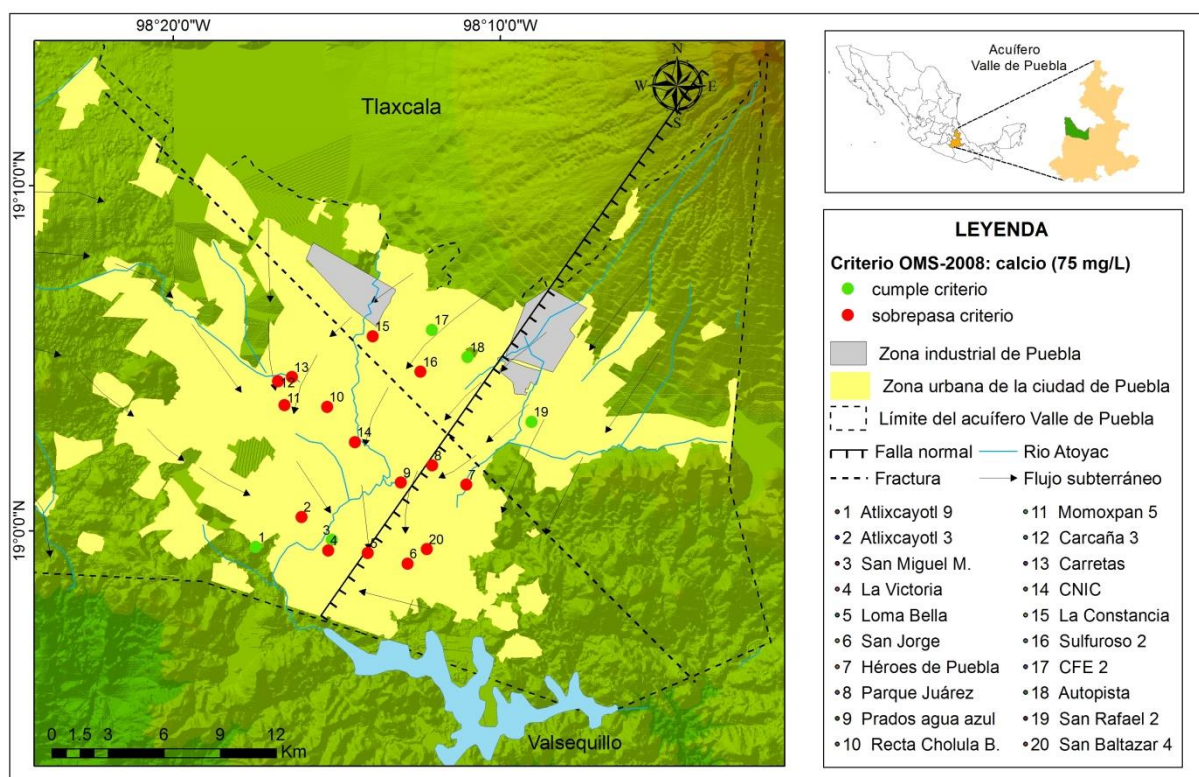


Figura VIII.28. Mapa de evaluación de calidad del agua con los criterios de la OMS para Ca^{2+} en la ciudad de Puebla.

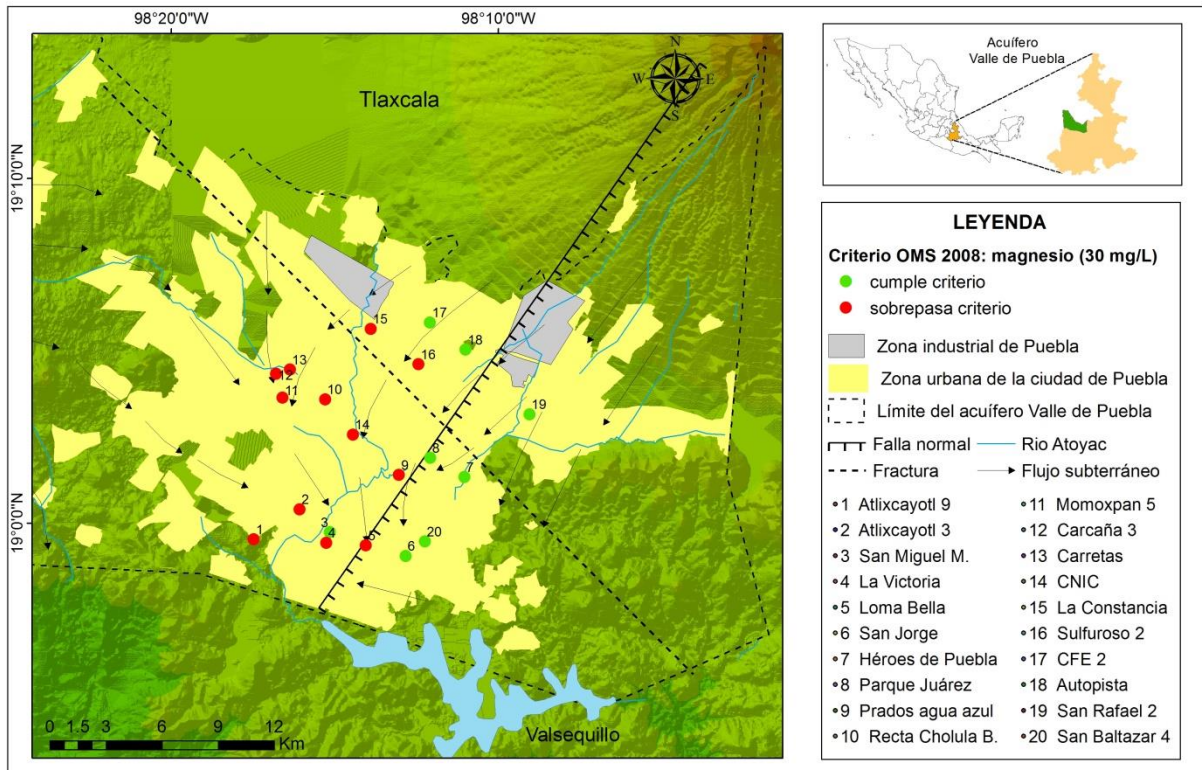


Figura VIII.29. Mapa de evaluación de calidad del agua con los criterios de la OMS para Mg^{2+} en la ciudad de Puebla.

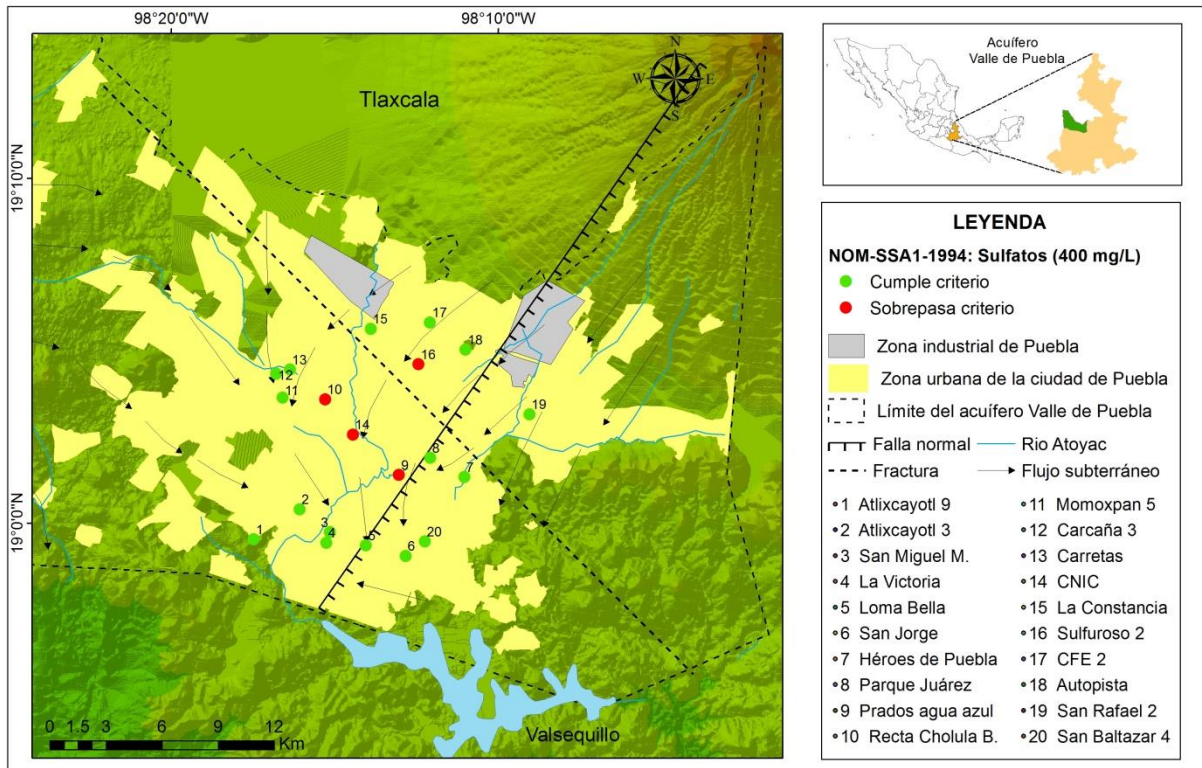


Figura VIII.30. Mapa de evaluación de calidad del agua con los criterios de la NOM para SO_4^{2-} en la ciudad de Puebla.

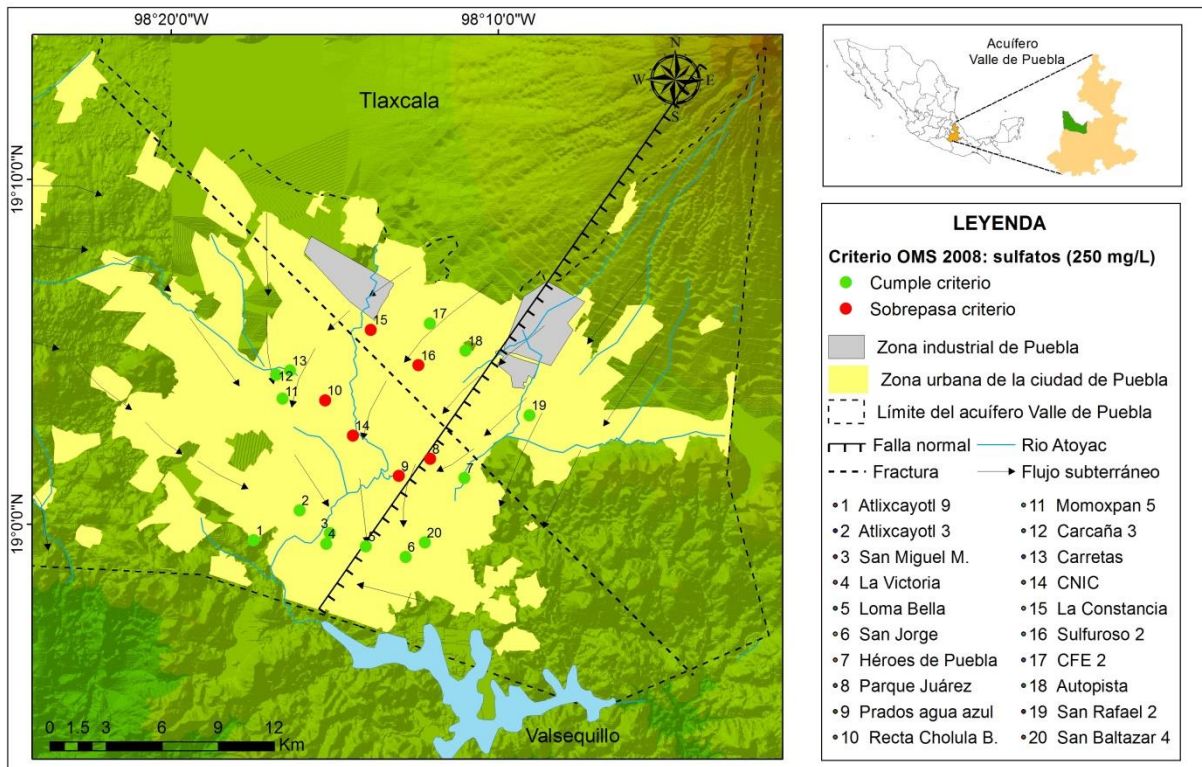


Figura VIII.31. Mapa de evaluación de calidad del agua con los criterios de la OMS para SO_4^{2-} en la ciudad de Puebla.

En el muestreo del 2016 también se observa la presencia de otros elementos químicos (Pb, Mn y B) que no habían sido detectados en muestreos anteriores (Figura VIII.32, Figura VIII.33, Figura VIII.34, Figura VIII.35 y Figura VIII.36), ni referidos por otros autores (Flores *et al.*; 2006; Gárfias *et al.*, 2010; Salcedo *et al.*, 2013).

Los elementos que sobrepasan los criterios nacionales e internacionales para agua de consumo humano son boro, plomo y manganeso. Estos pozos se ubican en toda la extensión norte, sur y oeste de la ciudad (pozos 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 20). Los resultados obtenidos de calidad del agua y especiación muestran que la presencia de estos metales pesados en el agua de los pozos analizados en la zona urbana de Puebla pueden presentar un riesgo a la salud no sólo por las altas concentraciones que exceden la norma mexicana y los criterios de la OMS, también por el tipo de compuesto que forman como se observó en el capítulo VIII.4.5.

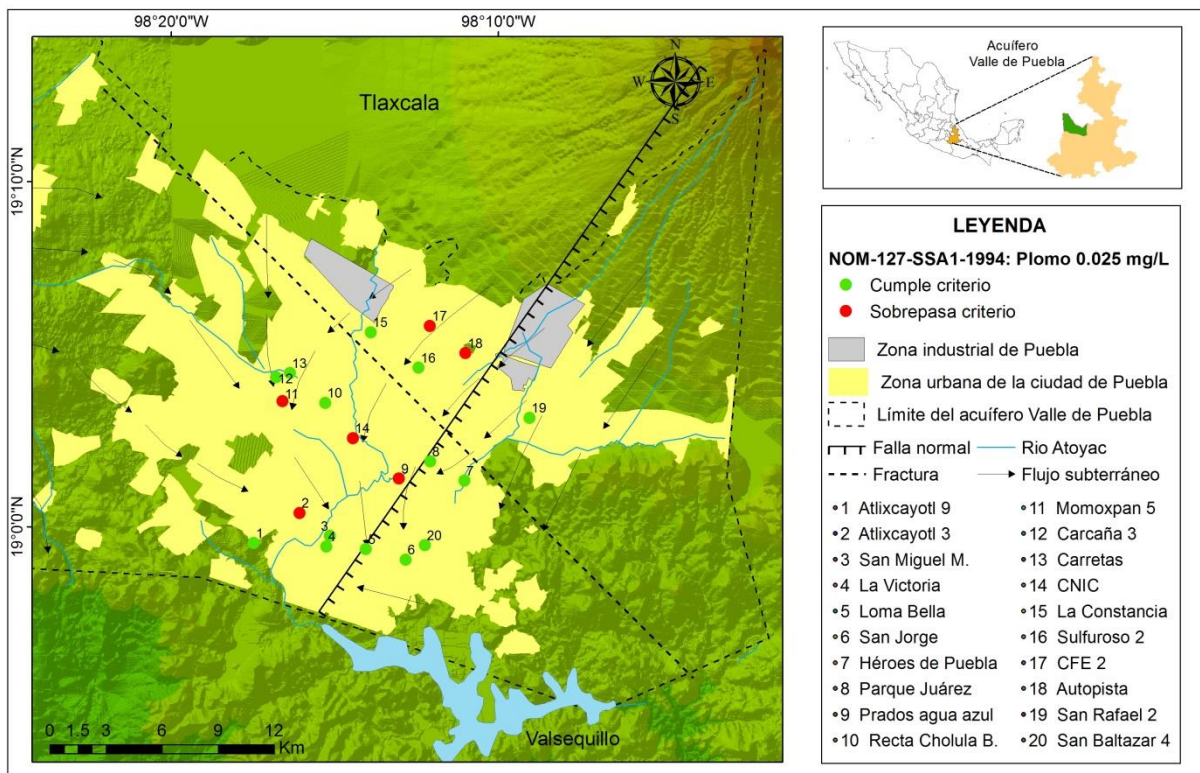


Figura VIII.32. Mapa de evaluación de calidad del agua con los criterios de la NOM para Pb total en la ciudad de Puebla.

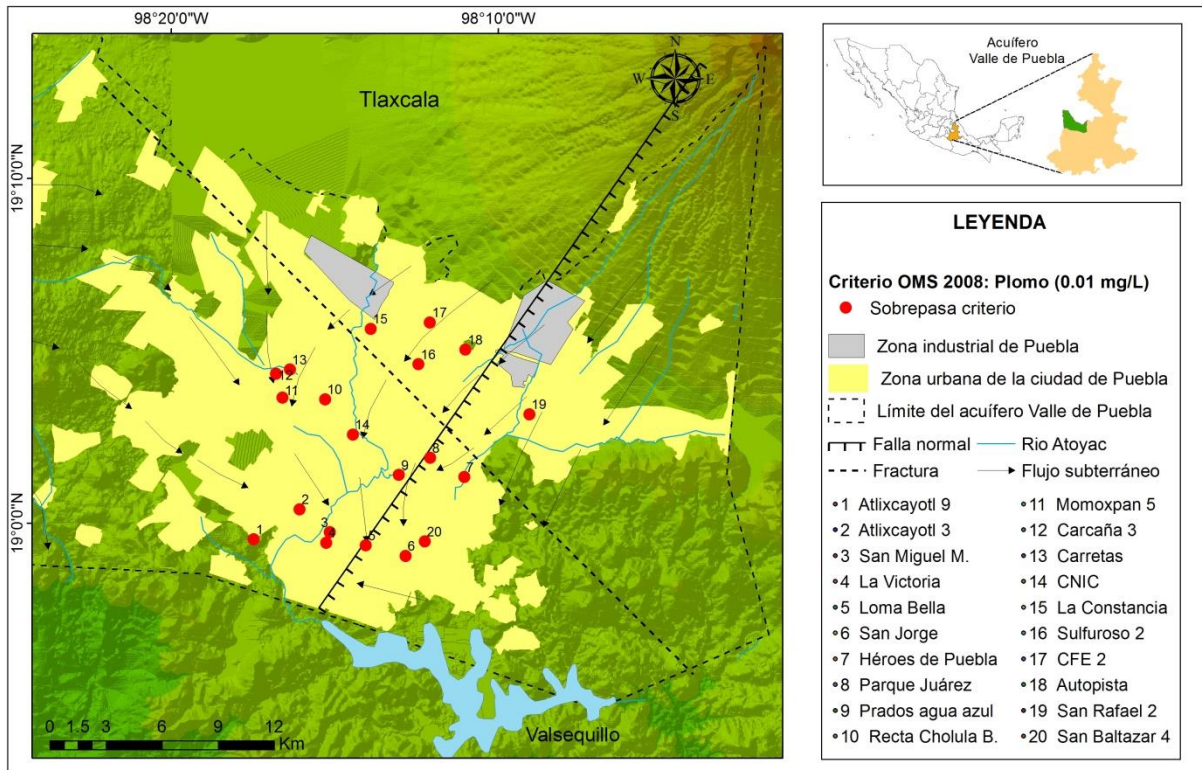


Figura VIII.33. Mapa de evaluación de calidad del agua con los criterios de la OMS para Pb total en la ciudad de Puebla.

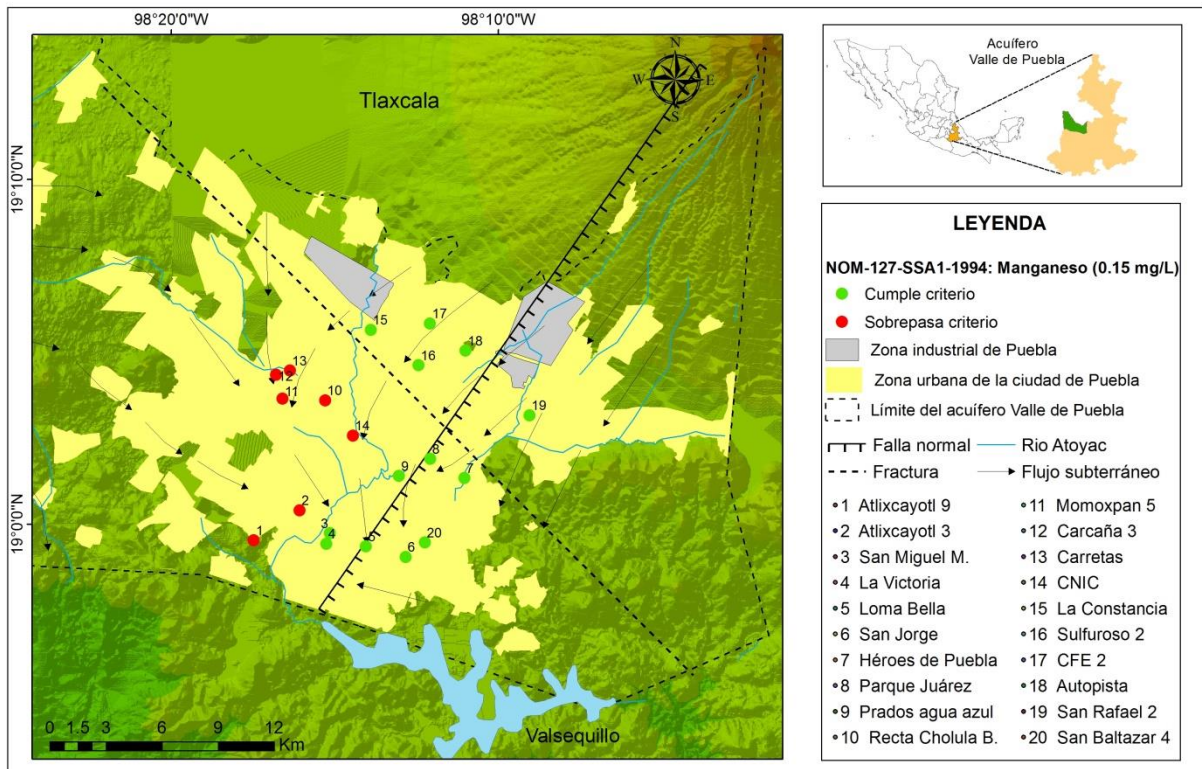


Figura VIII.34. Mapa de evaluación de calidad del agua con los criterios de la NOM para Mn total en la ciudad de Puebla.

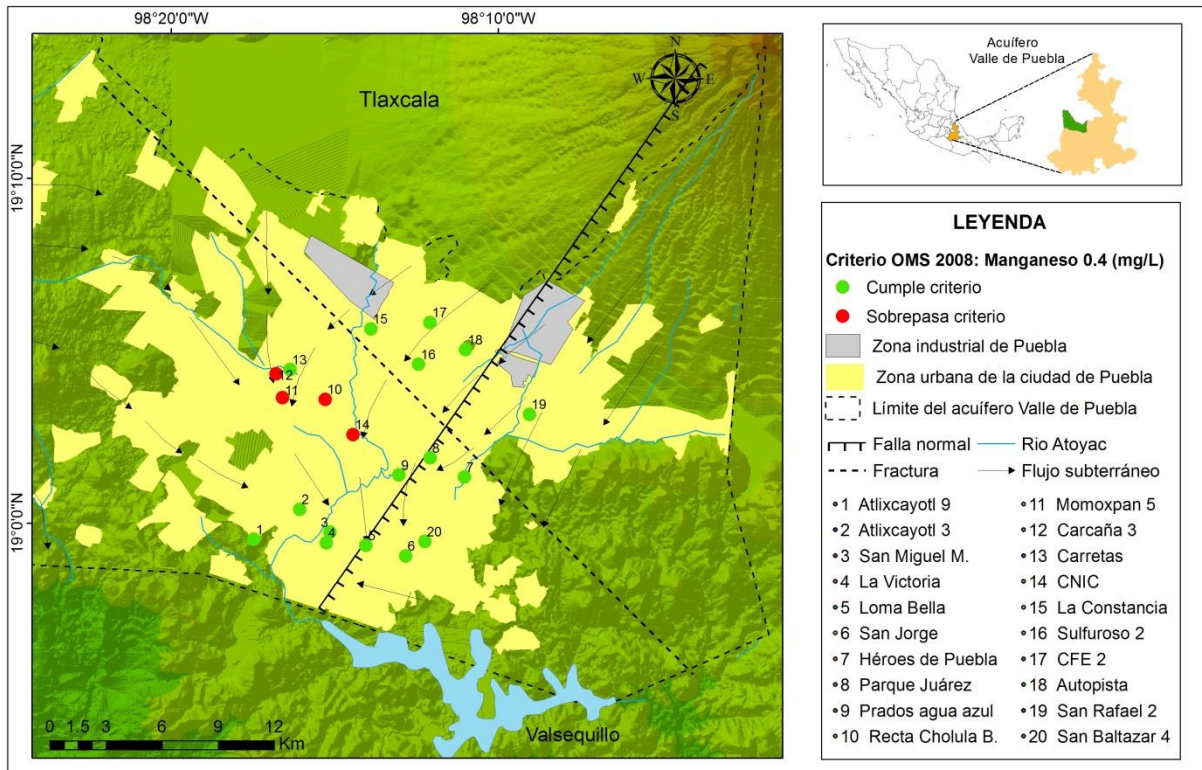


Figura VIII.35. Mapa de evaluación de calidad del agua con los criterios de la OMS para Mn total en la ciudad de Puebla.

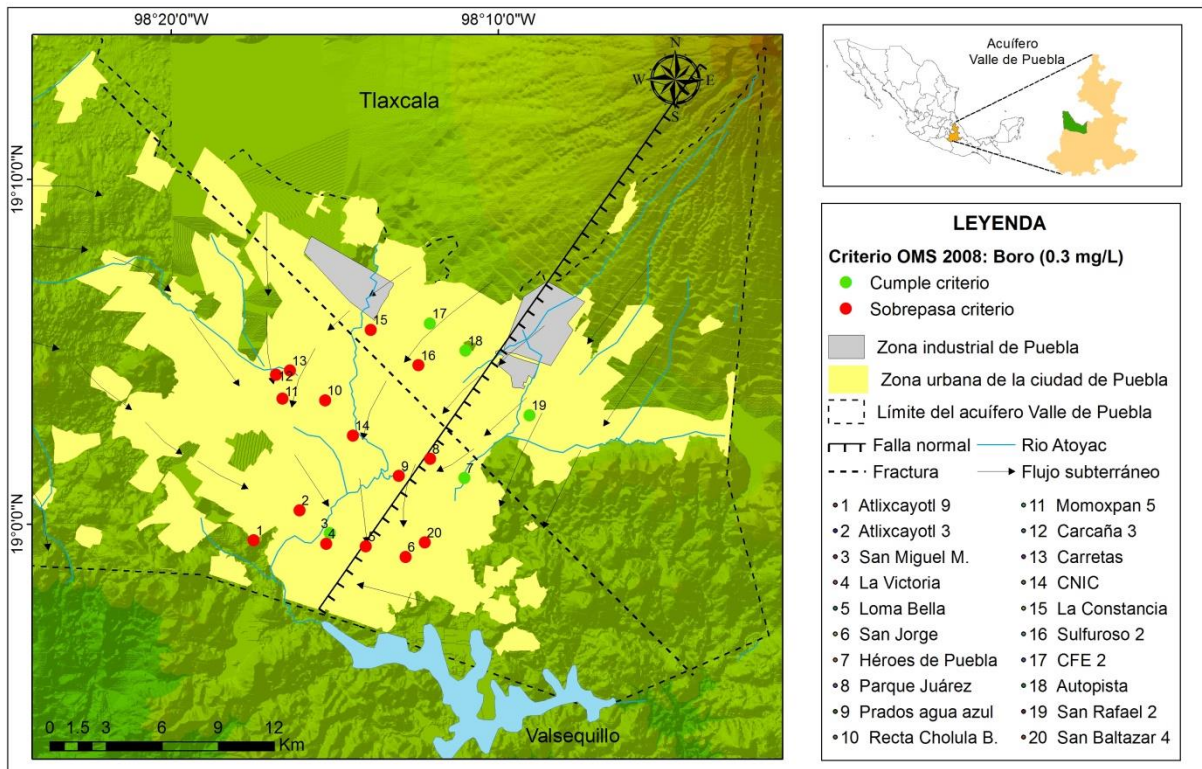


Figura VIII.36. Mapa de evaluación de calidad del agua con los criterios de la OMS para B total en la ciudad de Puebla.

Como se presentó en la Tabla II.2 donde se describe el funcionamiento de los pozos muestreados, 18 pozos bombean agua directamente para uso público urbano y doméstico, únicamente dos de los pozos reciben tratamiento, el pozo Sulfuroso 2 que pasa a través de un proceso de ósmosis inversa para la remoción de sulfuros en la planta potabilizadora San Felipe y el pozo Momoxpan 5 que pasa por un proceso de ablandamiento por inducción electrónica, para este proceso, se utilizan equipos electrónicos anti calcáreos que reducen los efectos de incrustación de los minerales en el agua en la planta Quetzalcóatl (Silva *et al.*, S.f.; Camacho, 2013). El hecho de que la mayoría de los pozos no lleven un tratamiento donde se puedan remover los metales pesados presenta una amenaza para la salud pública. Por tal motivo se realizó una recopilación de los efectos y riesgos a la salud que se presentan por ingerir agua con presencia de boro, plomo y manganeso.

El boro puede ser tóxico cuando se presenta como ácido bórico. Numerosos estudios han demostrado que el ácido bórico es absorbido por el tracto gastrointestinal y respiratorio. Los efectos que puede causar la exposición tóxica y aguda de ácido bórico son: trastornos generalizados y trastornos gastrointestinales (WHO, 2003). De acuerdo a la Environmental Protection Agency (EPA) se ha identificado que los fetos en desarrollo son potencialmente sensibles al boro (ATSDR, 1992; EPA, 2008).

El plomo es una sustancia tóxica acumulativa principalmente en niños y bebés. Afecta especialmente el sistema nervioso. La intoxicación aguda por plomo presenta síntomas de mareo, irritabilidad, poca capacidad de atención, dolor de cabeza, temblor muscular calambres abdominales y daño renal. Las concentraciones entre 0.08 y 0.1 mg/L de plomo afectan la memoria y encefalopatía (WHO, 2011).

La exposición a altas concentraciones de manganeso pueden causar efectos que incluyen alteraciones del comportamiento y otros efectos del sistema nervioso, tales como movimientos lentos y sin coordinación (ATSDR, 2012).

VIII.6.2 Análisis de la variabilidad histórica de calidad del agua

Para analizar la variabilidad temporal de los parámetros fisicoquímicos se representaron los datos de los años 2011, 2013 y 2016 a través de diagramas de cajas y bigotes. Se realizaron los diagramas con las variables: pH, Sólidos Disueltos Totales, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^- , todos los parámetros se expresaron en unidades de mg/L, excepto el pH que es adimensional. Se compararon los datos con los límites máximos permisibles que establece la norma mexicana NOM-127-SSA1-1994 y con los criterios de calidad del agua para consumo humano que establece la OMS en el 2008.

En la Figura VIII.37 se observa que el rango del pH para los años evaluados es variado y los valores han ido cambiando. El máximo reportado en 2011 fue de 8.6, en el 2013 y 2016 fue de 7.7, estos últimos dentro del rango de la norma mexicana y de los criterios de la OMS. Los valores mínimos de pH son muy variados y también han disminuido. Todos los años evaluados están por debajo de los criterios de calidad de la OMS (pH: 6.5) con valores de 6.4 en 2011, 5.4 en 2013 y 6.3 en 2016. Para todos los años, los valores promedio se encuentran dentro del rango establecido.

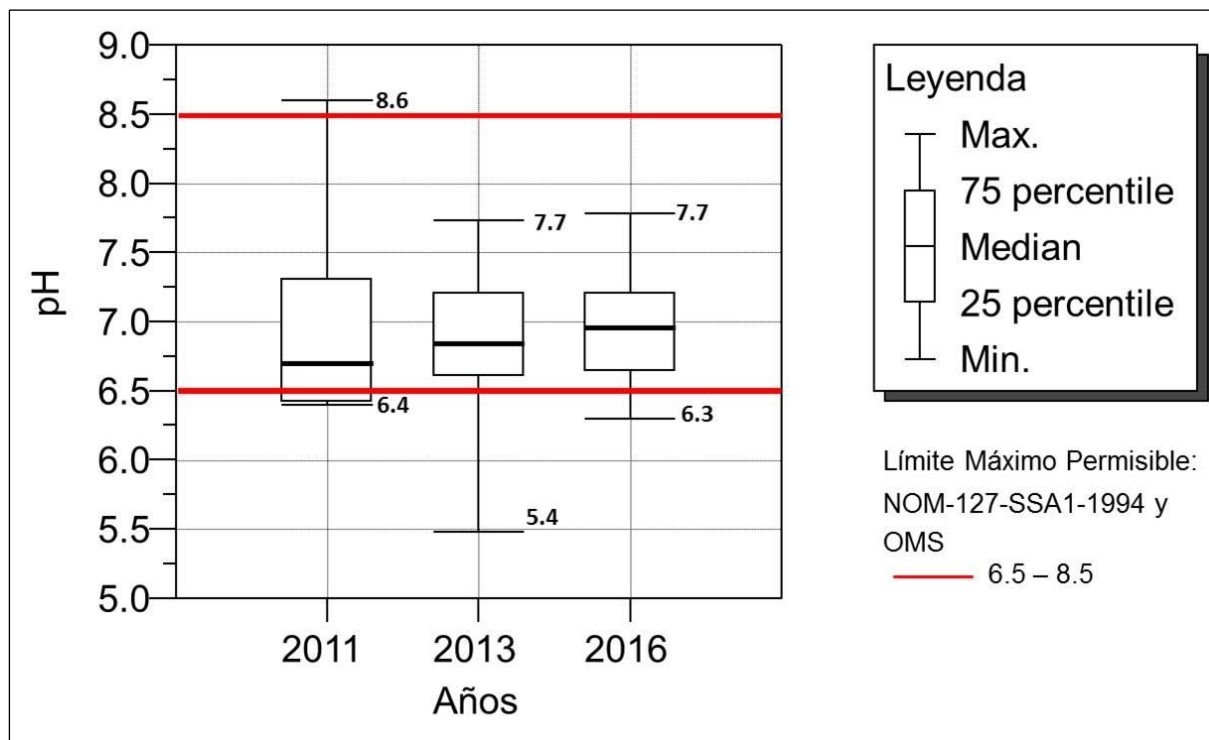


Figura VIII.37. Diagrama de cajas y bigotes para pH.

La Figura VIII.38 muestra un aumento significativo de 950 mg/L en las concentraciones máximas de SDT del 2011 al 2016. Los valores máximos sobrepasan el criterio de la norma

y la OMS (1000 mg/L) durante los años evaluados. Se observa que la concentración media de SDT está en el límite permisible de los criterios evaluados.

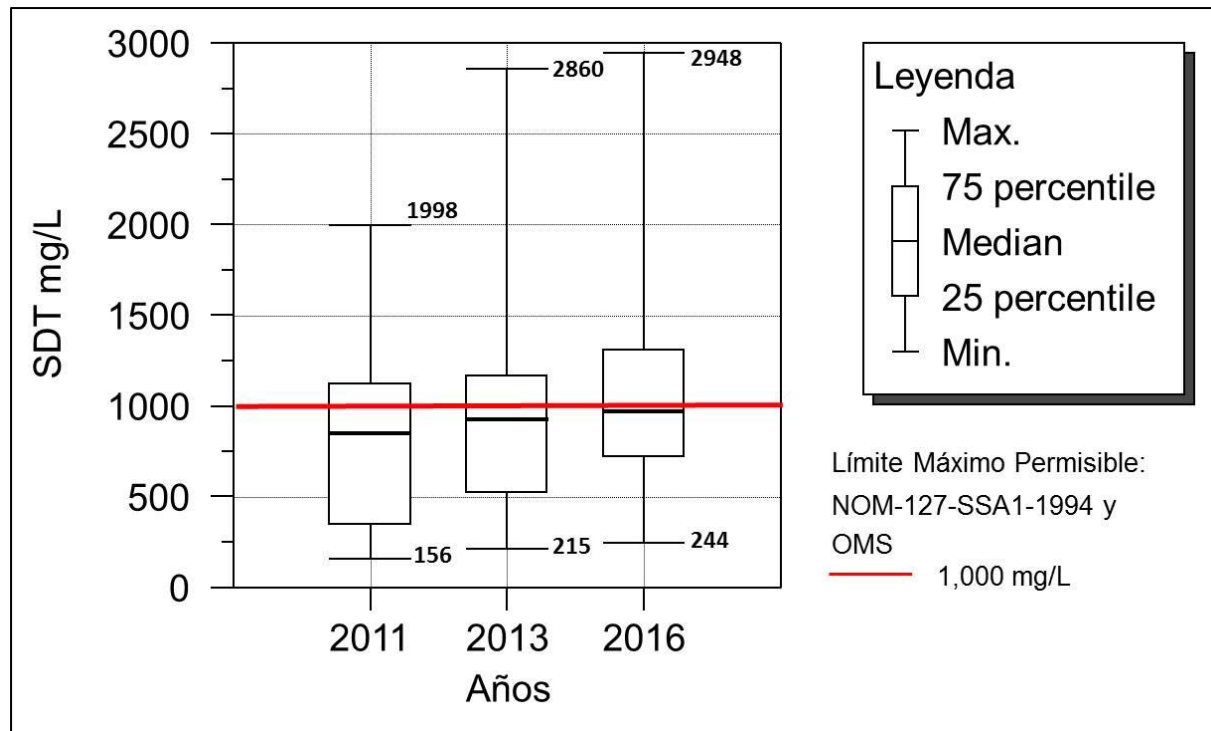


Figura VIII.38. Diagrama de cajas y bigotes para SDT.

En el caso del calcio no hay un límite máximo establecido por la norma, como referencia se tomó el criterio de la OMS (75 mg/L). Como se puede observar en la Figura VIII.39 los valores máximos (489, 458 y 526 mg/L) sobrepasan el criterios normativo en todos los años evaluados. Para 2011 la mediana fue de 136.5 mg/L, excediendo el criterio por 61.5 mg/L, en 2013 aumentó a 139.2 mg/L y sobrepasó el límite por 64.2 mg/L y en el 2016 fue de 157.6 mg/L excediéndose por 82.6 mg/L. En general desde el 2011 al 2016 la media para calcio ha aumento 21.1 mg/L. Además se observó un incremento de 37 mg/L en las concentraciones máximas de calcio del 2011 al 2016.

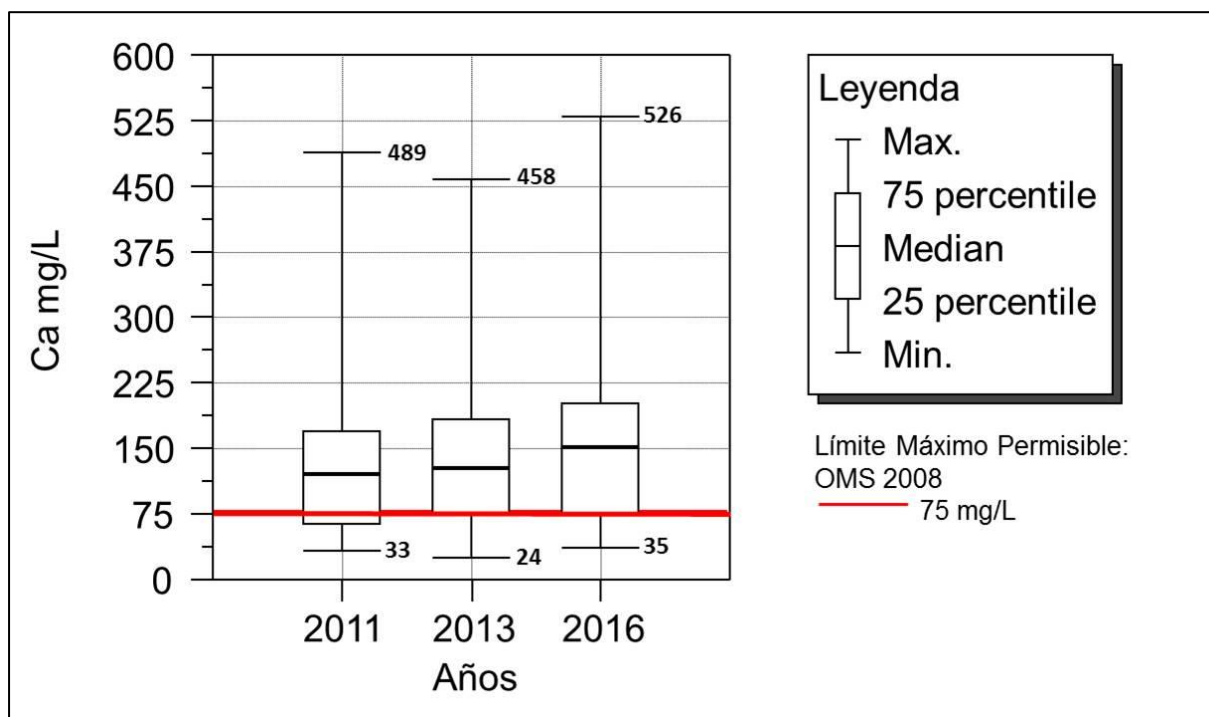


Figura VIII.39. Diagrama de cajas y bigotes para calcio.

El magnesio al igual que el calcio no está dentro de los parámetros de la normatividad mexicana, por lo que se consideró el criterio de la OMS de 30 mg/L. En la Figura VIII.40, se puede observar que las concentraciones medias y máximas sobrepasan el criterio establecido por la OMS. Los valores máximos en todos los casos sobrepasan el criterio. Para los años 2013 y 2016 el 25 percentil se encuentra en el límite del criterio; esto quiere decir que aproximadamente sólo el 25% de los datos cumplen con la normatividad.

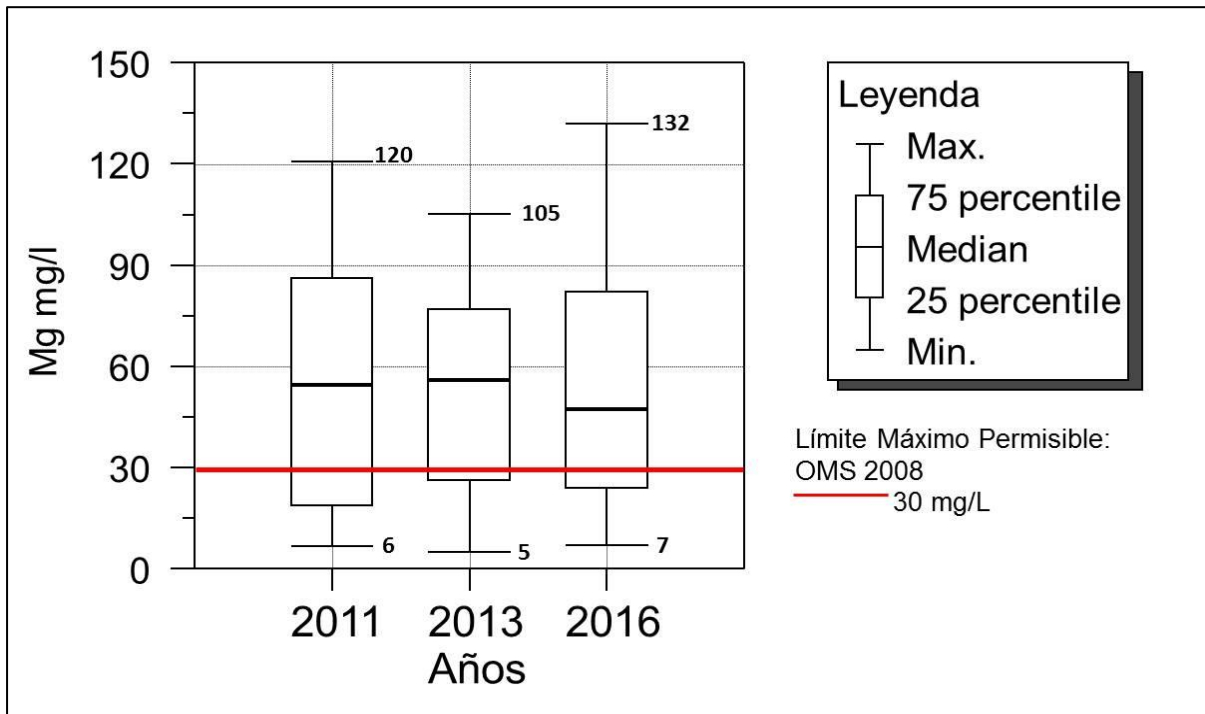


Figura VIII.40. Diagrama de cajas y bigotes para magnesio.

El sodio cumple tanto los criterios de la OMS y como el criterio establecido en la NOM-127-SSA-1994 de 200 mg/L (Figura VIII.41), en los tres periodos las concentraciones se encuentran por debajo de ese límite.

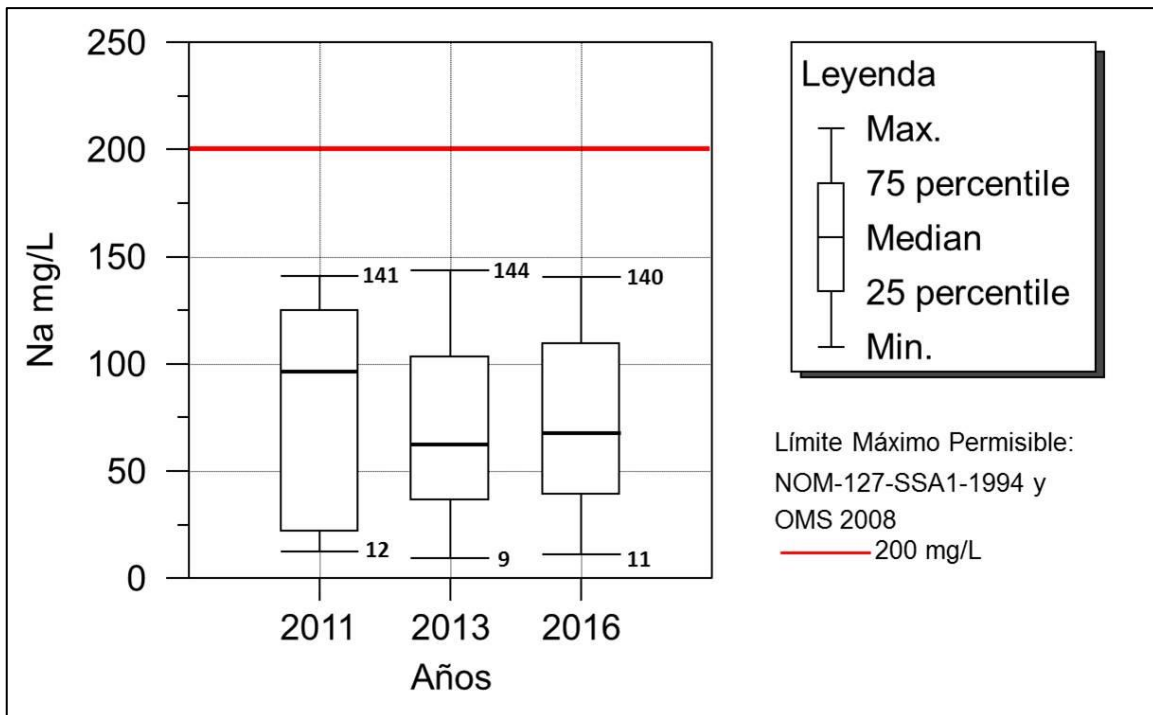


Figura VIII.41. Diagrama de cajas y bigotes para sodio.

Las concentraciones de bicarbonatos no presentan variaciones significativas durante los años evaluados; sin embargo, se observa una ligera disminución entre el 2011 y 2016 en la media y los valores máximos de 88 y 34 mg/L respectivamente. Este parámetro no está considerado en los criterios normativos (Figura VIII.42).

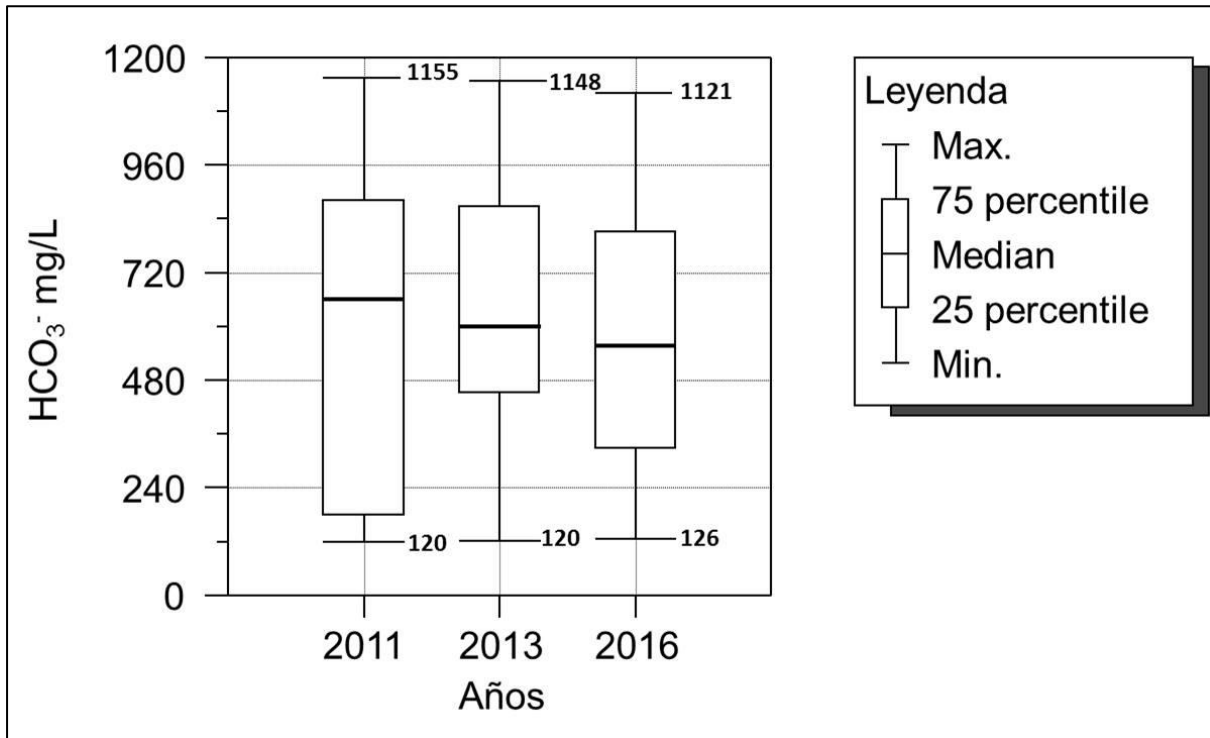


Figura VIII.42. Diagrama de cajas y bigotes para bicarbonatos.

En la Figura VIII.43 se muestra que hay un aumento en la concentración de sulfatos a través de los años. La concentración máxima entre los años 2011 y 2016 ha aumentado 383 mg/L y la concentración media de los sulfatos durante los años evaluados se mantiene por debajo del límite de la nom-127-SSA1-1994 y la OMS 2008 (400 y 250 mg/L respectivamente).

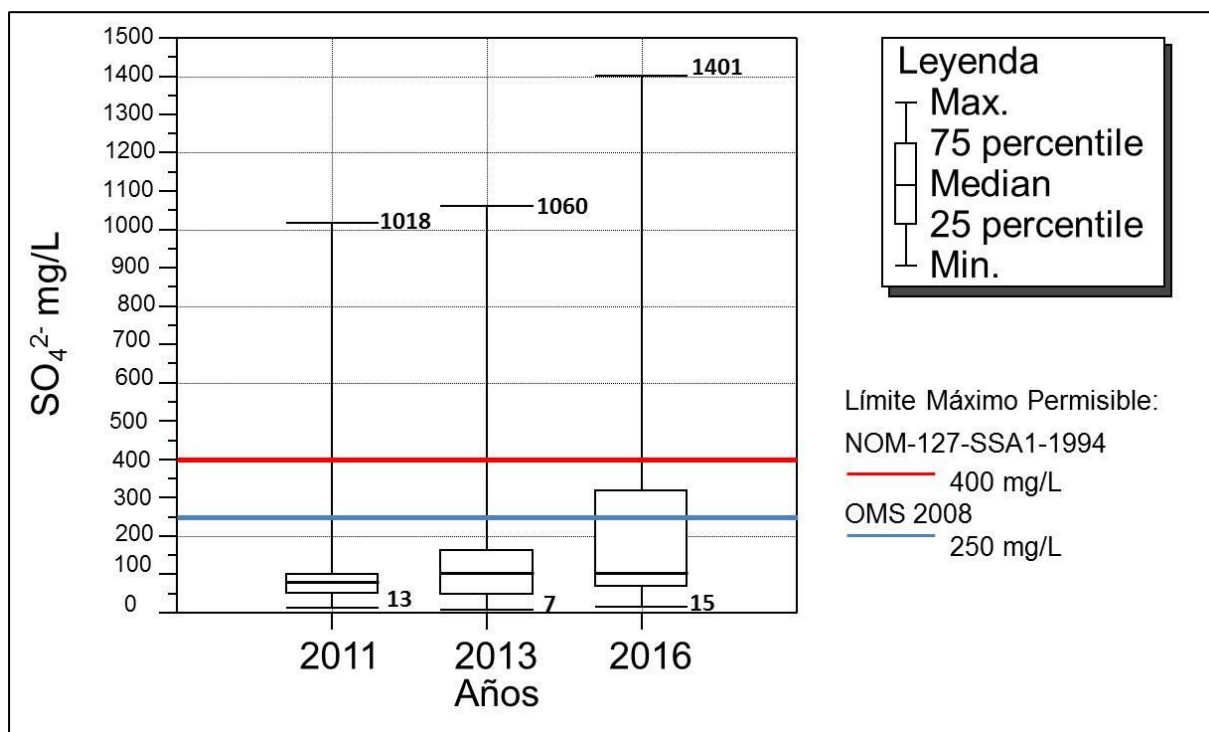


Figura VIII.43. Diagrama de cajas y bigotes para sulfatos.

Las concentraciones de cloruros en todos los años evaluados están dentro del criterio establecido por la norma y la OMS, ambos establecen 250 mg/L; sin embargo, se observa que hay un aumento en la concentración media y máxima de cloruros a través de los años de 11.36 y 81 mg/L respectivamente (Figura VIII.44).

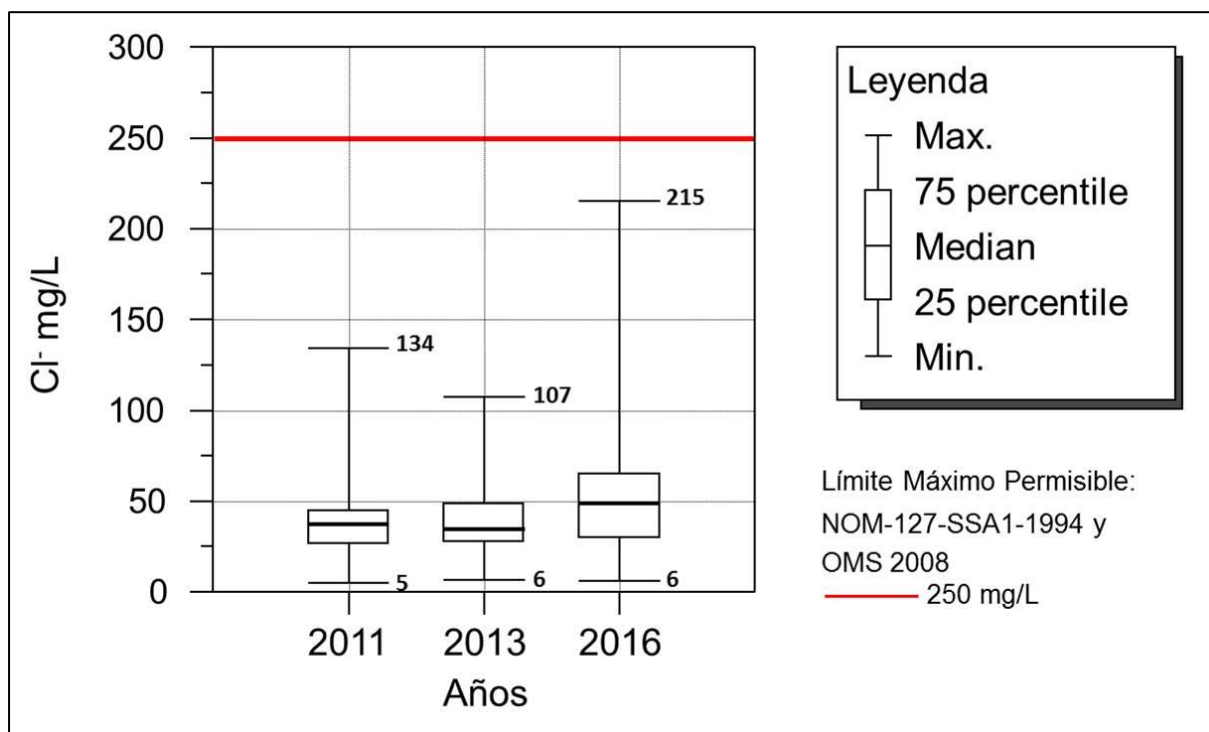


Figura VIII.44. Diagrama de cajas y bigotes para cloruros.

Como se puede observar en la Figura VIII.45 durante los años 2011 y 2013 la concentración máxima de nitratos no rebaso el límite establecido por la norma mexicana y la OMS (44.5 y 50 mg/L). Mientras que para el año 2016, el valor máximo fue de 64 mg/L por lo que sobrepasó los criterios de calidad; sin embargo, la concentración media en todos los años evaluados no supera el límite máximo permisible de la norma mexicana ni el criterio de la OMS.

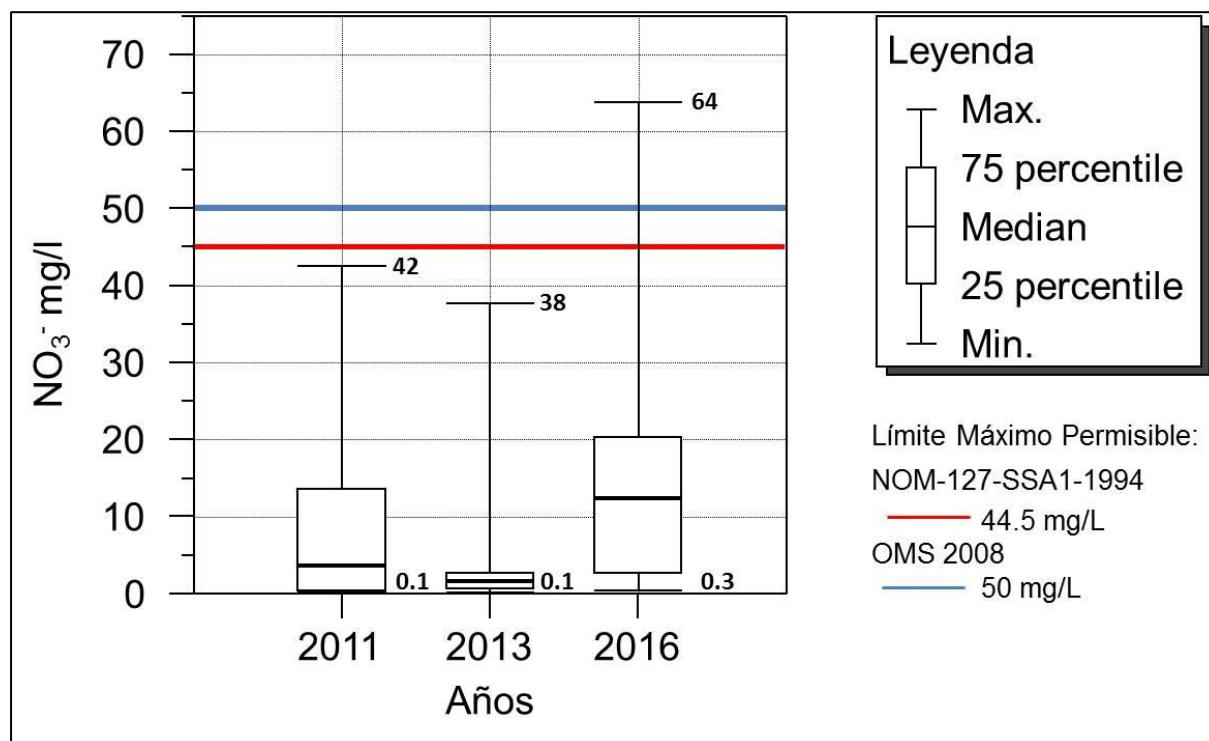


Figura VIII.45. Diagrama de cajas y bigotes para nitratos.

VIII.7 Análisis de la composición química del agua con respecto al medio

En esta sección se llevó a cabo un análisis que integra las características hidrogeoquímicas, el medio geológico donde el agua está contenida, la evolución del nivel piezométrico y los factores antropogénicos que han influenciado la composición química del agua subterránea.

Conforme al análisis de la evolución de las concentraciones de calcio, magnesio y sulfatos, se obtuvo que provienen del agua mineralizada del acuífero profundo que está contenido en rocas calizas, dolomías y evaporitas; esta agua asciende través de las fracturas y fallas geológicas y se mezcla con agua del acuífero superior. Al analizar la evolución piezométrica se observa que existe un cono de abatimiento con descenso promedio de 2 m/año en la zona centro de la ciudad de Puebla como se mostró en la Figura VIII.3 del análisis piezométrico; este fenómeno se ha hecho más evidente y más grave por la explotación intensiva al ser el agua subterránea la principal fuente de abastecimiento de la ciudad, y de municipios conurbados como: Puebla, San Pedro Cholula, San Andrés Cholula y Amozoc.

Con el análisis hidrogeoquímico se obtuvo que la composición química del agua del acuífero profundo se asocia al proceso de dedolomitización que ocurre cuando los minerales yeso y dolomita se disuelven y causan la precipitación de la calcita, aportando iones Ca^{2+} , Mg^{2+} y SO_4^{2-} al agua. De acuerdo al cálculo del índice de saturación, para los años 2013 y 2016 se observó que existe una tendencia de disolución de yeso y dolomita en la mayoría de los

pozos, lo cual indica que continuarán aumentando las concentraciones de sulfatos, calcio y magnesio en dichos pozos. Debido a esta razón, se ha presentado una evolución en las familias de agua principalmente en la zona urbana donde se manifiesta el mayor abatimiento.

De acuerdo al análisis de la variabilidad histórica de calidad del agua (2011-2016), se corroboró que al aumentar las concentraciones de sulfatos, han disminuido las concentraciones de bicarbonatos. Lo cual indica que la extracción de agua sulfatada proviene de mayores profundidades y con mayor tiempo de residencia en el acuífero, debido a que el agua bicarbonatada es representativa de origen meteórico de reciente infiltración (DOF, 2016).

De acuerdo a la Figura VIII.46, el agua mineralizada de tipo sulfatada y mixta con calcio y magnesio (familias de agua de color rojo y naranja) se ubica en la zona de mayor abatimiento (2.5 m/año) y provienen de los estratos profundos del acuífero, donde el gradiente hidráulico de los niveles piezométricos favorece la inducción del flujo por medio de la falla y fractura geológica.

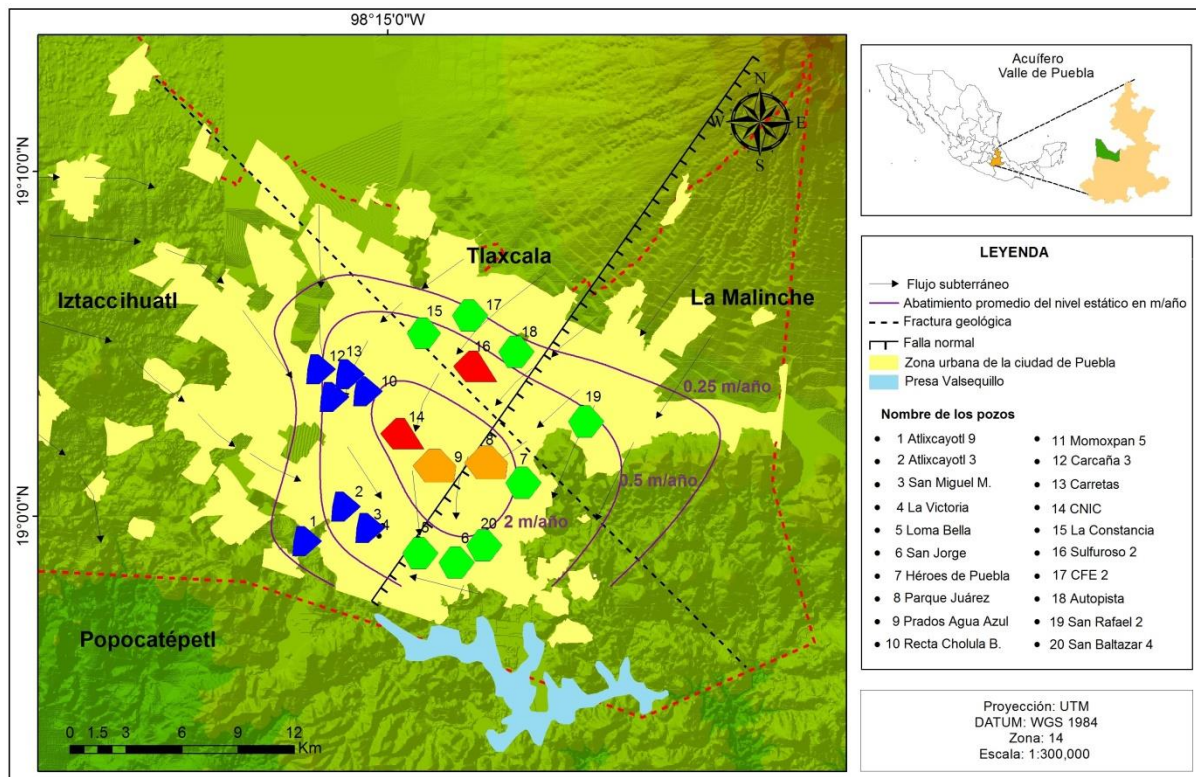


Figura VIII.46. Mapa de la distribución espacial de los tipos de agua en la zona urbana de Puebla.

Los resultados del análisis químico del laboratorio mostró la presencia de elementos traza y metales pesados (B, Ba, Fe, Mn, Pb y Sr); el origen de estos elementos puede atribuirse a los procesos naturales de erosión de rocas y minerales y a procesos antropogénicos.

El hierro y manganeso están presentes en el subsuelo de la zona de estudio producto de la erosión de minerales que se encuentran comúnmente en rocas ígneas volcánicas, basaltos y rocas sedimentarias que incluyen calizas y dolomías (Hem, 1992; Valdivia, 1997; Ellis, 1999; Nadaska *et al.*, 2010).

Las concentraciones de bario pueden tener un origen en las rocas ígneas volcánicas y sedimentarias como calizas y areniscas que forman parte de los estratos geológicos del acuífero (Waller, 1982; Hem, 1992).

La presencia de boro puede deberse a las rocas sedimentarias y rocas volcánicas. También puede ser producto de los gases emitidos por los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y la Malinche, ya que el boro contenido en los gases volcánicos tiende a volatilizarse y se libera como ácido bórico (H_3BO_3); las partículas una vez sedimentadas pueden infiltrarse y entrar en contacto con el agua subterránea (Butterwick *et al.*, 1989; Hem, 1992).

En la zona industrial, ubicada en el norte de la ciudad de Puebla, se tiene cinco parques industriales que tiene industrias variadas pero los principales giros son metal-mecánica, curtidoras, siderúrgica, textil, papelera, electrodomésticos y productos de limpieza que utilizan compuestos que generan boro residual y plomo; en algunos casos las aguas residuales industriales son descargadas al río con altas concentraciones de estos compuestos que se describen en la Tabla VIII.13 y pueden tener conexión con el acuífero a través del flujo superficial por la diferencia de niveles piezométricos o a través de las fallas y fracturas, y lo cual se ve favorecido con la dirección el flujo subterráneo que va desde la zona norte, hacia el centro y sur de la ciudad.

En la zona de estudio como ya se mencionó existen cinco parques industriales en la Tabla II.3 se conforma la información por giro industrial y los parámetros significativos que se generan en las aguas residuales.

Tabla VIII.13. Parámetros significativos en aguas residuales para los principales giros industriales de la ciudad de Puebla

Giro industrial	Parámetros significativos en aguas residuales industriales
Textil	DQO, sólidos suspendidos, Aceites y grasas, sólidos disueltos totales, compuestos fenólicos, sulfuro, alcalinidad, metales pesados y color.
siderúrgica	Aceite y grasas, sólidos suspendidos, cloruro, sulfatos, amoníaco, cianuro, fenoles, hierro y metales pesados (Pb, B, Ba, Fe, Mn, etc.).
Automoción/ automotriz y metalmecánica	Sólidos suspendidos, sólidos disueltos totales, aceites y grasa, cromo, fósforo, cobre, níquel, hierro, zinc, plomo, cadmio, amoníaco, nitratos, cloruros, sulfatos, estaño, fenoles y cianuros.
Pintura	DQO, aceites y grasas, sólidos suspendidos totales, estirenos, acetonas, xilenos, bencenos, fenoles y metales pesados (Pb, B, Ba, Fe, Mn, etc.).
Curtido	Sólidos disueltos totales, sólidos suspendidos totales, DBO ₅ , DQO aceite y grasas acidez, cromo, sulfito y metales (Pb, B, Ba, Fe, Mn, etc).
Papelera	DBO ₅ , DQO, carbono orgánico total, SDT, coliformes totales y fecales, color, metales pesados, amoníaco, aceite y grasas, fenoles y sulfito.

Fuente: Yáñez, 1980; Comisión Nacional del Medio Ambiente, 1998; Saldaña y Gómez., 2006.

IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Partiendo de los datos piezométricos, hidrogeoquímicos, de calidad y estadísticos analizados en la presente investigación, puede llegarse a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

Del análisis de la evolución piezométrica de 2002 a 2012 (datos disponibles) se obtuvo que existe en el centro de la zona urbana de la ciudad un abatimiento promedio de 2 m/año, debido a la explotación intensiva del agua subterránea. Los pozos que se ubican en la zona de abatimiento manifiestan un deterioro en la calidad del agua por efecto del gradiente hidráulico que favorece la inducción de agua mineralizada proveniente del acuífero profundo hasta el acuífero superior a través de las fallas y fracturas.

Los resultados del análisis hidrogeoquímico muestran que predominan cuatro tipos de familias de agua en la zona de estudio: bicarbonatada-cálcica, bicarbonatada-mixta, sulfatada-cálcica y mixta-cálcica. Además se identificó una evolución en el quimismo del agua, que muestra la migración de agua tipo bicarbonatada cálcica a sulfatada cálcica, y una modificación intermedia a agua mixta (concentraciones proporcionales de iones mayoritarios).

La química del agua del acuífero profundo está definida por el proceso de dedolomitización, que ocurre cuando se presenta la disolución de los minerales yeso y dolomita y la precipitación del mineral calcita. Al comparar los datos del índice de saturación del 2013 y 2016 se obtuvo que existe una tendencia de disolución-precipitación de los minerales (calcita, dolomita y yeso o anhidrita), por lo que se prevé un aumento en las concentraciones de sulfato, calcio y magnesio, una reducción de los bicarbonatos y reducción de pH a valores menores de 8.

Con el análisis estadístico de Cluster se corroboró que los pozos ubicados en la zona de mayor abatimiento son los principales afectados en el deterioro de su calidad debido al ascenso de agua mineralizada, dicho análisis mostro la existencia de 5 grupos que evidencian la evolución de las facies hidrogeoquímicas.

Del estudio de evolución de la calidad y composición química del agua se observó un aumento significativo en las concentraciones de calcio, magnesio, sulfatos, sólidos disueltos totales y dureza total, así como la presencia de plomo, bario, boro y manganeso.

Se detectaron por primera vez concentraciones por arriba de los límites recomendados por los criterios para agua de consumo humano de elementos traza y metales pesados. Para

bario y manganeso su origen puede atribuirse a procesos de intemperismo de las rocas en el acuífero.

Las concentraciones de plomo pueden deberse a las descargas de aguas residuales industriales (textil, curtido, pinturas y metal mecánica) que puede llegar al acuífero desde el flujo superficial por la diferencia de niveles piezométricos o a través de las fallas y fracturas.

La presencia del boro puede ser producto tanto de procesos naturales como antropogénicos, una fuente probable son las emisiones volcánicas de la zona (por los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y la Malinche), que contienen ácido bórico, el cual tiende a volatilizarse y una vez sedimentado puede infiltrarse al subsuelo, otra fuente son los productos de limpieza que se vierten a través de las descargas tanto domésticas como industriales.

Conforme a la presente investigación y a los estudios realizados por Salcedo *et al.*, 2013 y 2016, en la zona metropolitana de Puebla si continúa con la extracción actual en escenario hidrogeológico inercial sin alternativas de manejo, se tendrían abatimientos del orden 10 a 13 metros en un período a 15 años, principalmente en la zona centro de la ciudad de Puebla, y cambios en la composición química del agua subterránea por el ascenso de agua mineralizada a través de las fallas por la diferencia de niveles y posible contaminación por corrientes superficiales.

Sería importante que las autoridades responsables del suministro de agua en la zona urbana consideren hacer análisis de metales pesados periódicamente para tener monitoreo óptimos y completos que permitan establecer directrices de prevención y aseguren la salud de los consumidores.

El presente trabajo de investigación, representa una alternativa que marca puntos importantes para establecer las pautas de manejo y tratamiento en un marco de sustentabilidad y de intercambio eficiente de agua entre los usuarios.

X. BIBLIOGRAFÍA

1. Alfaro, P. E. M., Santos, P. M., y Castaño, S. C. (2006). *Fundamentos de hidrogeología*. Madrid, España. Mundi-Prensa Libros.
2. Alley, W. M. (1993). *Regional ground-water quality*. New York, United States of America: John Wiley & Sons.
3. Appelo, C. A. J., y Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Second edition. Amsterdam, the Netherlands: A.A. Balkema Publishers.
4. Aqueous Solutions LCC. 2016. Geochemist's Workbench (version 11) [software]. Department of Geology at the University of Illinois UrbanaChampaign. Disponible en: <https://www.gwb.com/>.
5. Arroyo, N. (2005) Determinación del origen de la contaminación natural en el acuífero del valle de Puebla mediante análisis geoquímicos isotópicos. Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca de Lerdo, México.
6. ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) (1992). *Toxicological Profile for Boron*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Public Health Service, U.S. Department of Health and Human Services. Disponible en: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp26.html>. Consultado el 27 de abril del 2016.
7. ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) (2012). Toxic Substances Portal. Disponible en <http://www.atsdr.cdc.gov/es/index.html>. Consultado el 27 de abril del 2016.
8. Ayuntamiento de Puebla (2014). Programa Municipal de Desarrollo de Puebla 2014-2018. Gobierno Municipal de Puebla, México.
9. Ayuntamiento de Puebla (2017). Juntas auxiliares: Gobierno Municipal de Puebla. <http://www.pueblacapital.gob.mx/juntas-auxiliares>
10. Barrera, M. L. (2010). Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de áreas de recarga en el acuífero de san salvador. Tesis de Maestra en gestión de recursos hidrogeológicos ciudad universitaria, Universidad de el Salvador. San Salvador.
11. Butterwick, L. N. de Oude, y K. Raymond (1989). Safety Assessment of Boron in Aquatic and Terrestrial Environments. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 17:339-371. (Citado en ATSDR, 1992).
12. Canadian Council of Ministers of the Environment (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.

13. Camacho, S. (2013) Invierte SOAPAP 6 pesos por metro cúbico de agua potable. Disponible en: <http://conlosojosabiertos.org.mx/index.php/secciones/noticias/item/invierte-soapap-6-pesos-por-metro-cubico-de-agua-potable>. Consultado el 07/07/2016.
14. Chow, V. T. (1964). *Handbook of Applied Hidrology*. Michigan, United States of America: McGraw-Hill.
15. CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2010). Estudio Geohidrológico del Acuífero Valle de Puebla, en el Estado de Puebla. Realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica, S.C. México.
16. CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2011). Estadísticas del agua en México, Edición 2011. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
17. CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2015a). Suspensión Provisional del Libre Alumbramiento. Publicado el 09 de junio de 2015. México Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/suspension-provisional-del-libre-alumbramiento-66099>. Consultado el 04 de marzo del 2016. México.
18. CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2015b). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Puebla (2104), Estado de Puebla. Diario Oficial de la Federación, 20 de abril, 2015. México.
19. CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2016). Estadísticas del agua en México, Edición 20116. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
20. Concesiones Integrales. (2014). Agua de Puebla para todos. Disponible en: <http://www.aguapuebla.mx/>. Consultado el 15 de junio del 2017.
21. Comisión Nacional del Medio Ambiente (1998). Guía para el control y prevención de la contaminación industrial. Santiago, Chile. Disponible en: <http://sinia.mma.gob.cl/>. Consultado el 15 de octubre del 2016.
22. COREMI, 2010; Cartas digitales de Geología del Consejo de Recursos Minerales 90-E14-5,89-E14-2, E-97-E14-3 y 98-E14-6. México.
23. Demant, A., 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista del Instituto de Geología de la UNAM*.2 (2), 172-187.
24. DOF (2000). 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". Diario Oficial de la Federación (DOF). 20 de junio de 2000.
25. DOF (2003). NOM-230-SSA1-2002, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos

- sanitarios para el muestreo”. Diario Oficial de la Federación (DOF). 4 de noviembre de 2003.
26. DOF (2016). Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los Estudios técnicos de Aguas Nacionales subterráneas del acuífero Valle de Puebla, clave 2104, en el Estado de Puebla, Región Hidrológico-Administrativa Balsas. Comisión Nacional del Agua, Diario Oficial de la Federación (DOF). 09 de febrero de 2016.
 27. Doménech, X., y Peral, J. 2006. *Química ambiental de sistemas terrestres*. Barcelona, España. Reverte.
 28. Ellis, J. B. (1999). Impacts of Urban Growth on Surface Water and Groundwater Quality. International Symposium Held During IUGG 99, the XXII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, at Birmingham UK. (No 259).
 29. EPA (Environmental Protection Agency). (2008). Regulatory Determinations Support Document for Selected Contaminants from the Second Drinking Water Contaminant Candidate List (CCL 2).
 30. Espinoza, M. (2014). Pozos de agua potable en Puebla están sobreexplotados. Disponible en: <http://www.poblanerias.com/2014/02/pozos-de-agua-potable-en-puebla-estan-sobreexplotados-mastretta/>. Consultado el 14 de junio del 2017.
 31. ESRI. (2011). ArcGIS Desktop: Release 10.3. New York. ESRI.
 32. Fagundo, J. R. (1990). Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales. Efecto de los factores geológicos, hidrogeológicos y ambientales. *Hidrogeología (Granada)*, 5: 33-46.
 33. Fagundo, J. R., Valdés, J. J., Y Rodríguez, J. E. (1996). Química del agua kárstica. *Hidroquímica del Karst*, (1), 13-212.
 34. Fagundo, J.R. (2005) Hidrogeoquímica. La Habana, Cuba, Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional (CENAMENT).
 35. Flores M. L., Jiménez S. G., Martínez S. R., Chávez R., y Silva P. D. (2006). Study of geothermal water intrusion due to groundwater exploitation in the Puebla Valley aquifer system, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 14 (7), 1216-1230.
 36. Foster, S., Kemper, K., Garduño, H., Nanni, N., y Tuinhof. (2006a). *Gestión sustentable del agua subterránea: Amenazas naturales a la calidad del agua subterránea*. Washington, D.C., United State of America: Banco mundial.
 37. Foster, S., Tuinhof, A., Kemper, K., Garduño, H. y Nanni, M. (2006b). *Caracterización de Sistemas de Agua Subterránea conceptos clave e ideas erróneas frecuentes*. Washington, D.C., United State of America: Banco mundial.

38. Foster, S., Kemper, K., Tuinhof, A., Koundouri, P., Nanni, M. y Garduño, H. (2006c). *Amenazas Naturales a la Calidad del Agua Subterránea evitar problemas y formular estrategias de mitigación*. Washington, D.C. United State of America: Banco mundial.
39. Freeze, R. A., y Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. United States of America: Prentice Hall, Inc.
40. García E. (1986). Apuntes de climatología: según el programa vigente en las carreras de biólogos, UNAM de la F.E.S. de Cuautitlán, UNAM y de la universidad autónoma metropolitana. México.
41. García J. A., Ramos y Ruíz, G. (2006). *Estadística administrativa*. Cádiz, España: Servicio Publicaciones UCA.
42. Gárfias, J., Arroyo, N., y Aravena, R. (2010). Hydrochemistry and origins of mineralized waters in the Puebla aquifer system, Mexico. *Environ Earth Sci*, 59, 1789–1805.
43. Golden Software, Inc. (1997). SURFER for Windows, version 6. Golden, Colorado: Golden Software, Inc.
44. 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.
45. Hamzaoui Azaza, F., Tlili Zrelli, B., Bouhlila, R., & Gueddari, M. (2013). An integrated statistical methods and modelling mineral–water interaction to identifying hydrogeochemical processes in groundwater in Southern Tunisia. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 25(3), 165-178.
46. Hem, J. D. (1963). Chemical equilibria affecting the behaviour of manganese in a natural water. *Hydrol Sci J*, 8:30-37. USA.
47. Hem, J. D. (1992). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (Vol. 2254). Department of the Interior, US Geological Survey.
48. INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2007), Banco de Información Económica, “Producto Interno Bruto por Entidad Federativa”. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/>. Consultado el 30 de marzo del 2017.
49. INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) Censos de población 1900-2010
50. INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2010). Información de recursos naturales. Puebla. Cartas digitales temáticas. México.
51. INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2015). Encuesta Intercensal (2015). Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/acces>

- [microdatos/encuestas/hogares/especiales/ei2015/](#). Consultado el 15 de febrero del 2017.
52. Instituto Minero y Geológico de España (IMGE) (S.f). Disponible en: <http://aguas.igme.es/divulgacion/librosE.htm> Consultado el 29 de mayo del 2016.
53. Isa, N. M., Aris, A. Z., Lim, W. Y., Sulaiman, W. N. A., y Praveena, S. M. (2014). Evaluation of heavy metal contamination in groundwater samples from Kapas Island, Terengganu, Malaysia. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(3), 1087-1100.
54. Jain, C. K., y Ali, I. (2000). Arsenic: occurrence, toxicity and speciation techniques. *Water Research*, 34(17), 4304-4312.
55. Jiménez G. (2005). Exploración de modelo de flujo y transporte en el acuífero del valle de Puebla. Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de geofísica, posgrado en ciencias de la tierra, Distrito Federal, México.
56. Kurmar, M., Ramanathan, A. L., Rao, M. S., y Kumar, B. (2006) Identification and evaluation of hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Delhi, India. *Environ Geol.* 50:1025–1039.
57. López Zamora, R. (2007). Los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento: El caso de la ciudad de Puebla 1984- 2006. Tesis de Doctorado en Economía. Puebla, México: BUAP
58. 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.
59. Menció, A. y Mas-Pla, J. (2008). Assessment by multivariate analysis of groundwater–surface water interactions in urbanized Mediterranean streams. *Journal of Hydrology*, 352, 35-366.
60. Meng, X. y Maynard, B. (2001). Use of statistical analysis to formulate conceptual models of geochemical behaviour: water chemical data from the Botucatu aquifer in Sao Paulotate, Brazil. *J.Hydrol.*, 250, 78–97.
61. Mooser, F., Montiel, A., y Zúñiga, Á. (1996), Nuevo mapeo geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla, Comisión Federal de la Electricidad (CFE). México.
62. Morell, I. y Hernández, F. (2000). *El agua en Castellón: un reto para el siglo XXI*. Castellón de la Plana, España. Universitat Jaume.
63. Mott, Henry. (2014) *Environmental process analysis. Principles and modeling*. New Jersey. United States of America. John Wiley & Sons.
64. Muñoz, P. M. J. (2013). RiuNet repositorio UPV. Universidad Politécnica de Valencia. [Online]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/> Consultado el 6 de marzo del 2017.

65. Nadaska, G., Lesny, J., y Michalik, I. (2010). Environmental aspect of manganese chemistry. *Hungarian Journal of Sciences*, 1-16.
66. Navarro, F. A. F. (2010). Caracterización y tratamiento de suelos contaminados por actividades mineras mediante materiales reactivos. *X Congreso Nacional de Medio Ambiente* (pp. 1-27).
67. Nyenje, P. M., Foppen, J. W., Uhlenbrook, S., & Lutterodt, G. (2014). Using hydrochemical tracers to assess impacts of unsewered urban catchments on hydrochemistry and nutrients in groundwater. *Hydrological Processes*, 28(24), 5860-5878.
68. Organización Mundial de la Salud (OMS). 2008. Disponible en: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwg/es/. Consultado el 5 de septiembre del 2016.
69. Parkhurst, L., y Appelo, A. (1999) PHREEQC (Version for windows). United States, Geological Survey [software].
70. Parks, G. (1965). The Isoelectric Points of Solid Oxides, Solid Hydroxides, and Aqueous Hydroxo Complex Systems. *Chem. Rev*, 65 (2), pp 177–198.
71. Portilla, E, Castillo, S., y Hernández, G. (2001). Caracterización hidrogeoquímica de las aguas de la sierra del rosario y las alturas del Mariel. Tesis para obtener el grado de Maestría. Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Nucleares. Cátedra de Medio Ambiente.
72. Plummer, Busby, John., Lee, Roger & Hanshaw, 1990. Geo-chemical modeling of the Madison aquifer in parts of Mon-tana, Wyoming and South Dakota. *Water sources research*, 26(9), 1981-2014.
73. Quest Software Inc. (2016). STATISTICA (StatSoft). Disponible en <http://statistica.io/>.
74. Ramiro, R.. (2015). La problemática de las juntas auxiliares y su población indígena. Disponible en: <http://documents.mx/documents/la-problematica-de-las-juntas-auxiliares-y-su-poblacion-indigena.html>. Consultado el 14 de junio del 2017.
75. Ruíz, V. (2017). Simulación del proceso HDS en Minera Sipán para la optimización de la remoción de manganeso en aguas de drenaje ácidas. Tesis de maestría. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.
76. Ruppe, L., y Ginn, T. (2008). *Groundwater: Quality*. California: Taylor & Francis Group, LLC. USA.
77. Salcedo, E., Esteller, M., Garrido S., y Martínez M. (2013). Groundwater optimization model for sustainable management of the Valley of Puebla aquifer, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 70(1), 337-351.

78. Salcedo E. (2013). Modelo hidro-económico basado en variables de calidad y cantidad para el apoyo en la toma de decisiones en el manejo de aguas subterráneas. Tesis de doctorado, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca de Lerdo, México.
79. Salcedo, E., Garrido, S., Esteller, M., y Morales, M. (2016). Application of water quality index to evaluate groundwater quality (temporal and spatial variation) of an intensively exploited aquifer (Puebla valley, Mexico). *Environmental monitoring and assessment*, 188(10), 573.
80. Saldaña F. y Gómez B. (2006). Caracterización de fuentes puntuales de contaminación en el río Atoyac, México. XXX Congreso de ingeniería sanitaria y ambiental. AIDIS.
81. Sánchez, F. J. (2012) Evolución geoquímica de las aguas subterráneas. Departamento de Geología, Universidad de Salamanca. España.
82. Sanz, A. J. (2014). *Química. Equilibrios químicos, teoría, ejercicios resueltos y prácticas*. Madrid, España: Editorial Visión Libros.
83. Samboni, N., Reyes, A., y Carvajal, Y. (2011). Aplicación de los indicadores de calidad y contaminación del agua en la determinación de la oferta hídrica neta. *Ingeniería Competitividad*, 13(2), 49 - 60.
84. Sacks, L. A. & Tihansky, A. B. 1996. Geochemical and isotopic composition of ground water, with emphasis on sources of sulfate, in the Upper Floridan Aquifer and Intermediate Aquifer System in southwest Florida. US Department of the Interior, US Geological Survey.
85. Secretaría de Economía. (2016) Información económica y estatal: Puebla. Disponible en: <http://www.gob.mx/se/articulos/puebla-y-sus-principales-sectores-productivos-y-estrategicos>. Consultado el 10 de abril del 2017.
86. SEMARNAT-CONAGUA, (2005). Integración del Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del acuífero de Alto Atoyac. México.
87. Silva, G., Browne, M., Hernández, Z., Toxtle, T, y Pérez, A., (S.f.) Funciones del agua y sistemas de tratamiento. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
88. SOAPAP. (2010). Información Básica del Sistema Operador de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Puebla. Puebla: Sistema Operador de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Puebla (SOAPAP). México.
89. Solans, X. (1985). Los complejos de Azufre en las soluciones hidrotermales. *Acta geológica hispánica*, 20(3), 241-243.

90. Stanley Manahan E. (2006). *Introducción a la química ambiental*. D.F. México, Reverte.
91. Tikhomirov, V. (2016). *Hydrogeochemistry Fundamentals and Advances, Groundwater Composition and Chemistry*. Beverly, United States of America. Scrivener publishing LLC.
92. Tuinhof, A., Dumars, C., Foster, S., Kemper, K., Garduño, H., y Nanni, M. (2006). *Gestión de recursos de agua subterránea: Una introducción a su alcance y práctica*. Washington D.C: Banco Mundial.
93. UNAM - INEGI, (1984). Geología de la República Mexicana. Coedición por convenio entre el Instituto de Estadística Geográfica e Informática y la Universidad Nacional Autónoma de México.
94. Valdivia U. J. (1997). Evaluación de procesos de tratamiento de hierro y manganeso solubles en aguas subterráneas. Tesis de la División de Estudios de Posgrado Facultad de Ingeniería Sección Ambiental UNAM. México.
95. Vargas, L. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS/OPS.
96. Vázquez S. E., y Jaimes P. R. (1989). Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 28(2) 133-190.
97. Villón, B. M. (2007) Drenaje. Cartago, Costa Rica. Editorial Tecnológica de CR.
98. Waller R. M. (1982). Ground Water and the Rural Homeowner. Pamphlet, U.S. Geological Survey. USA.
99. Waller, B. C. y Mendoza E. L. (2009). Introducción a la administración de los recursos hídricos bajo condiciones de escasez y rápido crecimiento urbano plantea un reto complejo de vital importancia. *Ingeniería hidráulica en México*, 24(4), 87-103.
100. WHO. (2003). Boron in Drinking-water Background document for development of World Health Organization (WHO). Guidelines for Drinking-water Quality.
101. WHO. (2011). Lead in Drinking-water Background document for development of World Health Organization (WHO). Guidelines for Drinking-water Quality.
102. Yidana, S. M., Ophori, D., y Banoeng Y. B., (2008). Hydrogeological and hydrochemical characterization of the Voltaian Basin: the Afram Plains area, Ghana. *Environmental Geology*, 53: 1213–1223.
103. Yidana, S. M., Banoeng, Y. B., y Akabzaa, T. D. (2011). Characterization of the groundwater flow regime and hydrochemistry of groundwater from the Buem formation, Eastern Ghana. *Hydrological Processes*, 25: 2288–2301.

104. Yáñez, C. F. (1980). Consideraciones de ingeniería en el tratamiento de desechos industriales. Curso de Pequeños Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales. CIDIAT. (pp. 1-26). Perú.