



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS**

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LAS SALINAS
Y AGUAS DEL VALLE DE TEHUACÁN, PUEBLA**

ESMERALDA OFELIA JUAREZ DE LA CRUZ

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MEXICO

2015

La presente tesis titulada: **Caracterización hidrogeoquímica de las salinas y aguas del Valle de Tehuacán, Puebla**. Realizada por la alumna: Esmeralda Ofelia Juárez De La Cruz; bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

Dr. CARLOS RAMÍREZ AYALA

ASESOR

Dr. HÉCTOR MANUEL ORTEGA ESCOBAR

ASESOR

Dr. EBANDRO USCANGA MORTERA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Julio 2015

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LAS SALINAS Y AGUAS DEL VALLE DE TEHUACÁN, PUEBLA.

Esmeralda Ofelia Juárez De La Cruz, M.C
Colegio de Postgraduados, 2015

RESUMEN

Las aguas que circulan a lo largo del cauce fluvial, en el estado de Puebla, parte de Tlaxcala y Veracruz, en su gran mayoría son utilizadas para el riego agrícola. Se recolectaron 110 muestras de agua en diferentes sitios para conocer las características fisicoquímicas, se llevó a cabo una investigación de tipo observacional, prospectiva, transversal y descriptiva. Lo que permitió conocer como varían las composiciones iónicas y las concentraciones electrolíticas de las aguas y así en cada muestra de agua se realizaron las determinaciones físico-químicas; temperatura (°C), Potencial de Hidrogeno (pH), Conductividad Eléctrica (CE); con los iones: calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+), potasio (K^+), carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-), sulfatos (SO_4^{2-}), cloruros (Cl^-), nitratos (NO_3^-), fosfatos (PO_4^{3-}), sílice (SiO_2) y boro(B), solidos totales disueltos y Presión Osmótica, con las determinaciones se clasificaron las aguas cualitativa y cuantitativamente, con base en la cantidad y el tipo de sales disueltas en éstas. La mayoría de las aguas fueron bicarbonatadas-cálcico-magnésicas, presentaron concentraciones iónicas medias y bajas, consideradas recomendables para riego. La calidad del agua y su uso es definida por las concentraciones iónicas parciales y totales.

Palabras clave: salinidad, riego, Puebla, Sodicidad, salinas

HYDROGEOCHEMISTRY CHARACTERIZATION OF SALINAS AND WATER
VALLEY TEHUACAN, PUEBLA.

Esmeralda Ofelia Juárez De La Cruz, M.C
Colegio de Postgraduados, 2015

ABSTRACT

The waters flowing over the riverbed, in the state of Puebla, Tlaxcala and Veracruz part, the vast majority are used for agricultural irrigation. 110 water samples were collected at different sites to meet the physicochemical characteristics, an investigation conducted observational, prospective, transversal and descriptive.

Allowing range known as ionic electrolyte compositions and concentrations of water and so on each water sample physicochemical measurements were performed; temperature (° C) Potential Hydrogen (pH), electrical conductivity (EC); with ions: calcium (Ca²⁺), Magnesium (Mg²⁺), sodium (Na⁺), potassium (K⁺), carbonate (CO₃²⁻), bicarbonate (HCO₃⁻), sulphates (SO₄²⁻) and chlorides (Cl⁻), nitrates (NO₃⁻), phosphate (PO₄³⁻), silica (SiO₂) and boron (B), total dissolved solids and Osmotic Pressure with water determinations were classified the qualitative and quantitative, based on the amount and type of dissolved salts these.

Most waters were bicarbonate-calcium-magnesium, presented stockings and low ionic concentrations, considered advisable for irrigation. Water quality and its use is defined by partial and total ionic concentrations.

Key words: salinity, irrigation, Puebla, Sodidity, salt

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECyT) por el financiamiento otorgado para la conclusión de mis estudios de postgrado.

Al Colegio de Postgraduados, por haberme brindado la oportunidad de seguir con mi formación académica y profesional.

A los profesores de mi Consejo Particular por su infinito apoyo y su orientación en las diferentes etapas de esta investigación.

Y a todas aquellas personas que directa o indirectamente formaron parte de mi estancia en el Colegio de Postgraduados, e hicieron de ésta una experiencia enriquecedora.

A todos gracias.

CONTENIDO

	Página
AGRADECIMIENTOS	v
CONTENIDO	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE CUADROS	xii
I. INTRODUCCION	1
II. OBJETIVOS E HIPOTESIS	3
III. REVISION DE LITERATURA.....	4
3.1 El agua y su distribución.....	4
3.2 Distribución en el planeta	4
3.3 Usos del agua en México	5
3.4 Origen de las sales solubles en las aguas naturales.....	5
3.5 Composición química de las aguas	8
3.6 Procesos de acumulación de sales.....	8
3.7 Sales solubles en aguas superficiales, subterráneas y freáticas	9
3.8 Tipos geoquímicos de aguas superficiales de la corteza terrestre.....	14
3.9 Solubilidad de las sales en las soluciones acuosas.....	16
3.10 Calidad del agua para riego.....	17
3.11 Criterios de salinidad	20
3.12 Criterios de Sodicidad.....	22
3.13 Criterios de toxicidad.....	33
3.14 Clasificación hidrogeoquímica	38
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	40
4.1 Descripción del área de estudio	40
4.2 Muestreo	44
4.3 Métodos analíticos	45
4.4 Comprobación de resultados de los análisis físico- químicos de aguas.....	45
V. RESULTADOS Y DISCUSION	49
5.1 ZONA DE INICIO DEL MUESTREO DE LOS ESTADO DE TLAXCALA, PUEBLA Y VERACRUZ.	50

5.1.1 Localización geográfica de los sitios de muestreo en la zona.	50
5.1.2 Concentración iónica de la zona.	51
5.1.3 Relaciones iónicas de las aguas superficiales	55
5.1.4 Distribución de cationes y aniones en las aguas	56
5.1.5 Relación entre la conductividad eléctrica determinada teóricamente y la conductividad eléctrica determinada experimentalmente	57
5.1.6 Relación de mg L^{-1} (STD) analíticos con respecto a la CE expresada en $\mu\text{S cm}^{-1}$	59
5.1.7 Relación de la suma de cationes y de aniones ($\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$) con la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de las aguas en Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	60
5.1.8 Índice de salinidad efectiva.....	61
5.1.9 Relación de Índice de salinidad potencial.....	62
5.1.10 Síntesis de clasificación de las aguas con base en su relación de adsorción de sodio (RAS)	63
5.1.11 Clasificación de las aguas en cuanto al peligro de la disminución de la infiltración	65
5.1.12 Carbonato de Sodio Residual en las aguas de los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.....	66
5.1.13 IONES ESPECIFICOS	67
5.2 SALINAS DE ZAPOTITLÁN SALINAS, PUEBLA	71
5.2.1 Localización geográfica de las salinas en el municipio Zapotitlán, Salinas Puebla	71
5.2.2 Concentración iónica de la zona de salinas en Zapotitlán, Salinas Puebla.....	73
5.2.3 Distribución de los cationes y aniones en las aguas	79
5.2.4 Relación entre la conductividad eléctrica determinada teóricamente y la conductividad eléctrica determinada experimentalmente	80
5.2.5 Relación de mg L^{-1} Solidos totales disueltos (STD) analíticos con respecto a la CE expresada en $\mu\text{S cm}^{-1}$	81
5.2.6 Relación de la suma de cationes y de aniones ($\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$) con la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de las aguas superficiales.	82
5.2.7 Relación de la presión osmótica (en atm) con la conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$).....	83

5.2.8 Contenido de nitrógeno, fósforo, boro y silicio en las aguas en las salinas, Puebla	84
5.2.9 Clasificación hidrogeoquímica de las aguas de las salinas en Puebla	88
5.3 VALLE ORIENTAL, VERACRUZ.....	89
5.3.1 Localización geográfica de los lagos cráter	89
5.3.2 Composición iónica de las aguas	90
5.3.3 Distribución de los cationes y aniones en las aguas	91
5.3.4 Composición de las sales hipotéticas de los lagos cráter.....	92
5.3.5 Relación entre las conductividades eléctricas determinadas experimentalmente y las determinadas teóricamente.....	94
5.3.6 Relación entre la concentración de sales (mg L^{-1}) y la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	95
5.3.7 Relación de la suma de cationes y aniones (en $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$) con la conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$).....	95
5.3.9 Hidrogeoquímica.....	97
VI. CONCLUSIONES	98
VII. RECOMENDACIONES	99
VIII. BIBLIOGRAFIA	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego (Richards, 1973).	24
Figura 2. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio. (Ayres y Westcot, 1987).	33
Figura 3. Diagrama triangular para representar resultados de estudios de química del agua (Piper, 1944).	39
Figura 4. Geología histórica de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	42
Figura 5. Hidrografía principal de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.	44
Figura 6. Ubicación de los puntos de muestreo de aguas en los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.	44
Figura 7. Localización geográfica de los sitios de muestreo de los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	49
Figura 8. Distribución de iones ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$) de las aguas superficiales.	56
Figura 9. Relación conjunta entre la conductividad eléctrica teórica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y la experimental ($\mu\text{S cm}^{-1}$), de las aguas superficiales.	58
Figura 10. Relación conjunta entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y los STD (mg L^{-1}), de las aguas superficiales.	59
Figura 11. Relación conjunta entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y cationes ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$), de las aguas superficiales.	60
Figura 12. Relación conjunta entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y aniones ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$), de las aguas superficiales.	61
Figura 13. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio (RAS_{or} , RAS_{aj} y RAS°) de las aguas superficiales.	65
Figura 14. Distribución de las aguas superficiales, de acuerdo con el contenido de carbonato de sodio residual ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$) muestreadas en Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	66
Figura 15. Concentración de Nitratos (mg L^{-1}) de las aguas superficiales de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	67
Figura 16. Concentración de Fósforo (mg L^{-1}) de las aguas superficiales de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	68

Figura 17. Concentración de Boro (mg L^{-1}) de las aguas superficiales de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.....	69
Figura 18. Concentración de Sílice (mg L^{-1}) de las aguas superficiales de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.....	70
Figura 19. Distribución de iones ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$) de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.....	79
Figura 20. Relación conjunta entre la conductividad eléctrica teórica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y la experimental ($\mu\text{S cm}^{-1}$), de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.	80
Figura 21. Relación conjunta entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y los STD (mg L^{-1}) de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.	81
Figura 22. Relación conjunta entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y cationes ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$), de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.....	82
Figura 23. Relación conjunta entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y aniones ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$) de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.....	83
Figura 24. Relación entre la presión osmótica teórica en atm y la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$, de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.....	84
Figura 25. Contenido de Nitrógeno de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.	85
Figura 26. Concentración de Fosfatos (mg L^{-1}) de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla...	86
Figura 27. Concentración de Boro (mg L^{-1}) de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.	86
Figura 28. Concentración de Silicio (mg L^{-1}) de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.....	87
Figura 29. Clasificación hidrogeoquímica de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.....	88
Figura 30. Diagrama de distribución iónica de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental.	92
Figura 31. Concentración iónica en porcentaje de $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental.....	93
Figura 32. Relación funcional entre la conductividad eléctrica teórica y la experimental, en $\mu\text{S cm}^{-1}$, de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	94
Figura 33. Concentración de sales expresadas en mg L^{-1} y su relación con la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	95

Figura 34. Relación de la suma de cationes en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ con la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	96
Figura 35. Relación de la suma de aniones en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ con la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	96
Figura 36. Clasificación hidrogeoquímica de las aguas de los lagos cráter.	97

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Usos Consuntivos y su fuente de extracción (CONAGUA, 2007).	5
Cuadro 2. Solubilidad del carbonato de magnesio en agua a una temperatura de 18°C, para diferentes presiones parciales de CO ₂	10
Cuadro 3. Solubilidad del carbonato de calcio de acuerdo con la cantidad del CO ₂ en el aire, a una temperatura de 16°C.	11
Cuadro 4. Solubilidad del carbonato de calcio con una presión parcial de CO ₂ de 0.00032 atm.	11
Cuadro 5. Lineamientos para evaluar la calidad del agua para riego.	19
Cuadro 6. Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con su salinidad efectiva.	22
Cuadro 7. Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con su salinidad potencial.	22
Cuadro 8. Concentración de Ca ^o en la solución del suelo, cerca de la superficie, que resultaría de regar con aguas de determinado valor de HCO ₃ ⁻ /Ca ²⁺ y CE del agua de riego. ^{1,2,3}	30
Cuadro 9. Clasificación del agua para riego de acuerdo con el CSR.	31
Cuadro 10. Clasificación de las aguas de riego de acuerdo a su contenido de cloruros.	34
Cuadro 11. Límites permisibles de boro en mg L ⁻¹ , establecidos por Wilcox en 1948, para diferentes clases de aguas de riego.	35
Cuadro 12. Marchas analíticas utilizadas para las determinaciones físico-químicas en aguas.	45
Cuadro 13. Criterios para aceptar el porcentaje de error en el balance de cationes y aniones contenidos en el agua de riego (APHA, 1995).	46
Cuadro 14. Localización de sitios de muestreo de las aguas superficiales obtenidas.	50
Cuadro 15. Concentración iónica del agua.	51
Cuadro 16. Valores teóricos de la conductividad eléctrica de los iones que comúnmente se encuentran en las aguas naturales.	58
Cuadro 17. Clasificación de las aguas, de acuerdo con su salinidad efectiva.	62
Cuadro 18. Clasificación de las aguas, de acuerdo con su salinidad efectiva.	63
Cuadro 19. Valores de las distintas formulaciones de RAS, de las aguas superficiales.	64
Cuadro 20. Localización de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.	71
Cuadro 21. Concentración iónica de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.	73

Cuadro 22. Localización de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	90
Cuadro 23. Características principales de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.	90
Cuadro 24. Concentración iónica de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.....	91

I. INTRODUCCION

La distribución del recurso agua es muy variable regionalmente, y se encuentra íntimamente ligada a satisfacer las necesidades más básicas, puesto que la disponibilidad de agua en cantidad y calidad es una condición necesaria para hacer viable el desarrollo social, económico y ambiental de nuestro país. En el tema del agua son especialmente visibles las implicaciones que tienen su preservación y manejo adecuado en la agricultura (CONAGUA, 2010).

Las aguas naturales que son contaminadas con aguas residuales pueden generar problemas de sodificación para los suelos que riegan la producción agrícola, debido a que las aguas residuales aportan sales solubles sódicas (Velázquez, 2001).

La mayor porción del agua subterránea disponible se encuentra en la Cuenca del Oriental (INEGI, 2010). La extracción en la cuenca se ha incrementado en los últimos años debido a la incorporación de áreas nuevas a la agricultura de riego.

Para establecer la factibilidad del uso de determinada agua de riego, es necesario que se consideren los siguientes factores: a). Composición química; b). Las particularidades de los cultivos agrícolas; c). El clima de la zona agrícola bajo riego; d). Las propiedades físicas de los suelos y e). Los métodos agronómicos que se utilizan en la explotación de los diferentes cultivos agrícolas (Kovda, et. al., 1967; Oster y Rhoades, 1986). La interdependencia de estos cinco factores, determina la posibilidad de uso de una fuente de agua para el riego de los cultivos agrícolas.

Las aguas de diferente origen, sean superficiales y subterráneas, se utilizan en la agricultura, en este estudio de carácter descriptivo se determinó la composición química y las concentraciones totales electrolíticas de estas aguas, con la finalidad de evaluar su calidad para uso en la agricultura. Para este objetivo se usaron diferentes índices de calidad para determinar los efectos del uso de estas aguas en los cultivos y suelos.

Las muestras de agua, fueron analizadas en el laboratorio de ciencias ambientales del Colegio de Postgraduados para determinar: potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD), Ca, Mg, Na, K, CO₃, HCO₃, Cl, SO₄, la determinación de los valores de la relación de adsorción de sodio RAS, en sus diferentes conceptualizaciones, presión osmótica.

Además se analizaron los contenidos de boro, ortofosfatos nitratos y silicio, con el propósito de hacer valoraciones preliminares sobre el deterioro de la calidad de las aguas que circulan por los diferentes cauces fluviales en los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

II. OBJETIVOS E HIPOTESIS

Con el objetivo de describir las propiedades físico-químicas de las aguas superficiales de los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz, y aguas salinas de los manantiales de Zapotitlán Salinas, estado de Puebla, se procedió a determinar analíticamente los siguientes parámetros fundamentales:

1. Determinar la composición iónica de las diferentes muestras de agua (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , pH, CE, PO, STD, PO_4^{3-} , B, NO_3^- y Si), con los valores de estos parámetros establecer diferentes relaciones funcionales que describan las características físico-químicas de las soluciones salinas.
2. Calcular los valores de Relación de Adsorción de Sodio (RAS) con sus diferentes conceptualizaciones: $\text{RAS}_{\text{original}}$, RAS_{aj} y $\text{RAS}^{\text{o corr}}$.
3. Establecer los índices de salinidad, salinidad efectiva y salinidad potencial con los valores analíticos de los diferentes iones.
4. Describir las características geoquímicas de las aguas superficiales de los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.
5. Caracterización hidroquímica de las aguas de Zapotitlán Salinas, Puebla.

HIPOTESIS

1. Las redes hidrográficas fluviales mantienen desde su inicio de formación hasta su desembocadura en el Golfo de México, atraviesan diferentes formaciones geológicas que condicionan la composición química de las aguas que se conducen por los distintos cauces.
2. La composición hidroquímica de las corrientes está en estrecha relación con los minerales con los que tiene en contacto, a lo largo de todo su cauce.

III. REVISION DE LITERATURA

3.1 El agua y su distribución

El agua es el compuesto químico más abundante y de mayor significado para nuestra vida. Su excepcional importancia desde el punto de vista químico, reside en que casi la totalidad de procesos que ocurren en la naturaleza, tienen lugar entre sustancias disueltas en agua (Gil, 2005).

Los antiguos griegos consideraron el agua como uno de los cuatro elementos de la realidad universal, junto con la tierra, el aire, y el fuego. Esta teoría duró por varios siglos, hasta que en el siglo XIX, una explicación científica surgió y desplazó así, más de 18 siglos de interpretaciones míticas; por primera vez se pudo escribir en papel la fórmula química del agua. Este resultado fue posible gracias a los físicos ingleses Henry Cavendish que en 1766 descubrió el hidrógeno y Joseph Priestley en 1744 el oxígeno. En 1783 Lavoisier hizo la primera síntesis del agua y le dio la fórmula HO, posteriormente con los trabajos del físico italiano Avogadro se dio la fórmula definitiva H₂O (Tortolero, 2000).

3.2 Distribución en el planeta

Aproximadamente $1.359 \times 10^{12} \text{ m}^3$ de agua existen en la naturaleza, cantidad que ha permanecido constante en el planeta desde su origen (Ramos *et al.*, 2003a). A pesar de que el 70% de la superficie del planeta está conformada por agua, 97.5% de ésta es salina (cerca de 1 400 millones de km³), contenida principalmente en océanos, y sólo un 2.5% es agua dulce (alrededor de 35 millones de km³).

Del agua dulce 68.9% se encuentra congelada (en bancos de hielo, glaciares y nieves perpetuas) y en la humedad del suelo; el 30.8% se almacena en aguas subterráneas y poco menos de 0.3% es agua superficial localizada en lagos, lagunas, ríos y humedales (Carabias, 2005). El agua que forma parte del ciclo hidrológico es de 0.77%, y del agua total equivale a 11 millones de km³ (Delgado, 2006).

3.3 Usos del agua en México

El 63% del agua utilizada en el país proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos), mientras que el 37% restante proviene de fuentes subterráneas. En el cuadro 1, se muestra la cantidad de agua que se utiliza para las diversas actividades según la fuente de extracción, para el año 2006.

Cuadro 1. Usos Consuntivos y su fuente de extracción (CONAGUA, 2007).

Uso	Usos consuntivos (km ³)		
	Origen		Volumen total
	Superficial	Subterráneo	
Agrícola ^a	39.7	19.7	59.4
Abastecimiento público ^b	3.9	6.8	10.7
Industria autoabastecida ^c	1.6	1.4	3.0
Termoeléctricas	3.8	0.5	4.2
Total	49.0	28.3	77.3

NOTA: 1 km³ = 1 000 hm³ = mil millones de m³

Los datos corresponden a volúmenes concesionados al 31 de diciembre de 2006.

a: Incluye los rubros agrícola, pecuario, acuacultura, múltiples y otros.

b: Incluye los rubros público urbano y doméstico.

c: Incluye los rubros industrial, agroindustrial, servicios y comercio.

3.4 Origen de las sales solubles en las aguas naturales

La principal fuente de sales en suelos y aguas de riego, es el intemperismo geoquímico permanente sobre las rocas que se encuentran en los espesores superficiales de la corteza terrestre y que tiene lugar durante todo el tiempo geológico. Este proceso de intemperismo elemental representa un eslabón entre el intercambio geoquímico de la materia entre los continentes y en océanos (Kovda *et al.*, 1967).

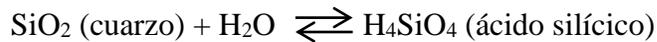
La mayoría de las rocas que conforman la corteza terrestre se han formado bajo condiciones de altas temperaturas y presiones. Los diferentes cristales que constituyen estas rocas, no son estables cuando estos minerales se encuentran expuestos a condiciones atmosféricas. Por lo anterior, el intemperismo es un proceso espontáneo que transforma los minerales primarios en otros minerales más estables en la superficie de la corteza terrestre. Los agentes que están involucrados en el intemperismo geoquímico son: el agua de lluvia, el oxígeno, el bióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el ácido sulfhídrico (H₂S).

En cuanto, la materia orgánica (MO) es un agente reductor, además de ser una fuente de ácidos orgánicos que promueven el intemperismo y la migración de cationes en forma de

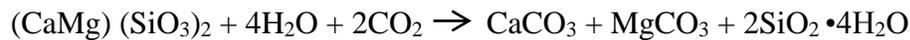
quelatos. En general, los minerales primarios se transforman en especies solubles, por medio de los efectos de los agentes del intemperismo, de acuerdo con el esquema siguiente:

Minerales → Especies solubles

Ejemplos de reacciones químicas del intemperismo:



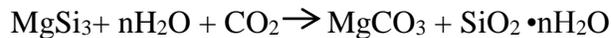
Intemperismo de silicatos de calcio y de magnesio:



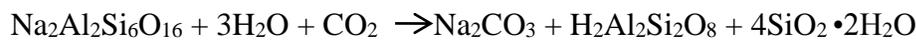
Intemperismo de aluminosilicatos que contienen calcio:



Intemperismo de silicatos magnésicos:



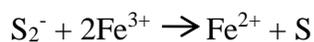
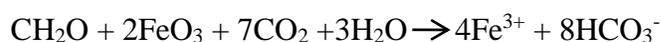
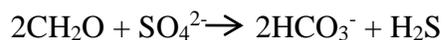
Intemperismo de aluminosilicatos que contienen sodio:

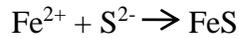


Intemperismo de aluminosilicatos que contienen potasio:



Procesos de reducción de nitratos, sulfatos y óxidos de hierro debido a la actividad biológica de microorganismos, con participación de la materia orgánica. Aquí el CH_2O representa la materia orgánica.





Como consecuencia de esto en todas las reacciones los procesos de reducción se forman bicarbonatos.

En síntesis, sobre el origen de sales solubles que salinizan los suelos y espesores subyacentes, se debe señalar lo siguiente:

1. Las fuentes primarias de sales solubles en la corteza terrestre son:
 - a) Emanaciones gaseosas volcánicas y plutónicas (lavas, fumarolas y magma) y productos de sus cambios y reacciones físico-químicas.
 - b) Sales y gases que se encuentran solubilizados en fuentes termales.
 - c) Productos de oxidación de algunos elementos de la atmósfera y de algunos de sus gases.
 - d) Productos solubles derivados del intemperismo de rocas cristalinas.
2. Durante estos procesos, los productos gaseosos solubles se presentan en forma de elementos (S, Cl) que se oxidan posteriormente o se solubilizan en las aguas.
 - a) Óxidos (SO_2 , SO , CO_2 , B_2O_3), que se solubilizan en las aguas y se transforman posteriormente en ácidos, por lo que estos compuestos reaccionan con diferentes rocas y se asocian con cationes alcalinos y alcalinotérreos.
 - b) Ácidos (HCl , H_2S , H_3BO_3).
 - c) Sales (NaCl , NH_4Cl).
3. La atmosfera es la fuente primaria de sales de los ácidos nítrico, nitroso y carbónico.
4. Una fuente fundamental de todos los tipos actuales de acumulaciones salinas es el intemperismo de rocas cristalinas, que dan lugar a carbonatos (CO_3^{2-}), sulfatos (SO_4^{2-}), cloruros (Cl^-) y boratos (BO_3^-) (Kovda et al., 1967).

3.5 Composición química de las aguas

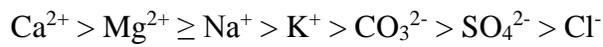
La composición química, es el conjunto de sustancias generalmente inorgánicas incorporadas al agua por procesos naturales, las sustancias orgánicas aunque frecuentes, aparecen en concentraciones menores. La incorporación de los constituyentes al agua es debida a su elevado poder disolvente y a sus propiedades de combinación (Ramos et al., 2003b).

Las especies iónicas en orden de abundancia presentes en agua atmosférica de acuerdo con Wetzel (1981) son las siguientes:



El agua marina tiene un contenido de sales disueltas de un 3.5%, constituidas principalmente por iones Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} y K^+ (Figueruelo y Dávila, 2004).

Según Wetzel (1981), las proporciones mundiales de los principales iones que se encuentran en las aguas continentales son:



3.6 Procesos de acumulación de sales

Los procesos de acumulación de sales solubles en suelos y aguas superficiales es necesario diferenciar los siguientes ciclos de acumulación de las mismas.

De tal manera que se tienen; a) Ciclos continentales, b) Ciclos limítrofes a los mares, c) Ciclos deltáicos, d) Ciclos artesianos y e) Ciclos antropogénicos.

En los procesos de formación de suelos salinos es necesario distinguir los diferentes ciclos de acumulación de sales, los cuales de acuerdo a Kovda (1967) pueden ser:

- a) Continentales. Están relacionados con el movimiento, redistribución y acumulación de sales de los ácidos: carbónico, sulfúrico y clorhídrico en las regiones intracontinentales sin escurrimiento.

- b) Limítrofes a los mares. Se relacionan con la acumulación de sales marinas, fundamentalmente de los cloruros de sodio, en las zonas bajas que limitan con el mar y en las orillas de pequeños golfos someros.
- c) Deltaicos. Están ampliamente distribuidos y son de gran importancia para el hombre debido a que las superficies de los deltas de los ríos, desde tiempos antiguos, han sido ampliamente utilizados para la agricultura.
- d) Artesianos. Se deben a la evaporación de aguas subterráneas interestratificadas y debido a subpresión se elevan a la superficie a través de grietas tectónicas y estructuras destruidas. Por lo general estas aguas son ricas en HCO_3 y SiO_2 .
- e) Antropogénicos. Son debidos a los errores que comete el hombre durante su actividad productiva por no conocer las leyes y regularidades de las acumulaciones salinas.

Los procesos de acumulación de sales están asociados con las condiciones climáticas, geomorfológicas, micromorfológicas, hidrogeológicas y biológicas de cada región.

Los aspectos orográficos también tienen importancia en la formación de suelos salinos ya que en las depresiones con drenaje restringido y rodeadas por cadenas montañosas, el agua que escurre desde las partes altas hacia las partes bajas lleva consigo sales disueltas que son depositadas en las partes más bajas (Kovda *et al.*, 1973).

3.7 Sales solubles en aguas superficiales, subterráneas y freáticas

Kovda *et al.* (1973) considera que “la fuente fundamental de todos los tipos actuales de acumulaciones salinas son los procesos de intemperismo de las rocas cristalinas y que forman a los carbonatos, sulfatos, cloruros y boratos”. Las sales más importantes que se forman en suelos y aguas son:

- a) Sales del ácido carbónico: Carbonato de calcio, carbonato de magnesio, carbonato de sodio y carbonato de potasio.
- b) Sales del ácido sulfúrico: Sulfato de calcio, sulfato de magnesio, sulfato de sodio y sulfato de potasio.
- c) Sales del ácido clorhídrico: Cloruro de calcio, cloruro de magnesio, cloruro de sodio y cloruro de potasio.

Las sales solubles más importantes que se encuentran en suelos y aguas de zonas áridas y semiáridas son las que a continuación se describen en los siguientes subcapítulos (Kovda *et al.*, 1967).

SALES DEL ÁCIDO CARBÓNICO

Las sales del ácido carbónico se encuentran en suelos, aguas freáticas de zonas áridas y semiáridas e incluso en estepas boscosas. El efecto de estas sales depende de su composición, cantidad de bicarbonatos (HCO_3^-) y carbonatos de sodio (Na_2CO_3) que se acumulan en suelos, aguas freáticas y superficiales, y en los niveles de solubilidad de las diferentes sales del ácido carbónico (H_2CO_3).

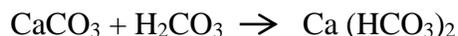
Carbonato de magnesio. Se caracterizan por una mayor solubilidad que el carbonato de calcio (Cuadro 2). En presencia del ácido carbónico, gracias a la formación de bicarbonatos de magnesio, la solubilidad del MgCO_3 aumenta de manera importante. Siendo el carbonato de magnesio una sal de una base fuerte y de un ácido débil, el MgCO_3 en el proceso de hidrolización le da a la solución valores de alta alcalinidad, de pH altos entre 9 y 10.

Cuadro 2. Solubilidad del carbonato de magnesio en agua a una temperatura de 18°C , para diferentes presiones parciales de CO_2 .

Presiones parciales de CO_2 (atm)	0.005	0.001	0.01	0.1	1.0	5.0	10.0
Contenido de carbonato de magnesio (g L^{-1})	2.51	3.11	6.04	12.2	25.8	46.0	59.2

Fuente: Kovda *et al.*, 1967.

Carbonato de calcio. Esta sal es de baja solubilidad (0.0131 g L^{-1}), pero aumenta considerablemente en presencia de ácido carbónico, gracias a la formación de bicarbonatos de calcio [$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$] debido a la reacción:



Prácticamente no es nociva para la mayoría de plantas. La solubilidad del carbonato de calcio se encuentra influenciada en gran medida por el contenido de bióxido de carbono (CO_2) disuelto en el agua (Cuadros 3 y 4).

Cuadro 3. Solubilidad del carbonato de calcio de acuerdo con la cantidad del CO₂ en el aire, a una temperatura de 16°C.

Contenido de CO ₂ en el aire en % (por volumen)	Contenido (g L ⁻¹)		
	De acuerdo con Schlening	De acuerdo con Weigner	pH
0.00	0.0131	0.0131	10.23
0.03	0.0634	0.0627	8.48
0.30	0.1334	0.1380	7.81
1.00	0.2029	0.2106	7.47
10.00	0.4700	0.4889	6.80
100.00	1.0986	1.0577	6.13

Fuente: Kovda *et al.*, 1967.

Cuadro 4. Solubilidad del carbonato de calcio con una presión parcial de CO₂ de 0.00032 atm.

Temperatura °C	0	5	10	15	20	25	30
CaCO ₃ (contenido)	0.081	0.075	0.070	0.065	0.060	0.056	0.052

Fuente: Kovda *et al.*, 1967.

Carbonato de sodio (Soda). Las sales del ácido carbónico y sodio se encuentran ampliamente distribuidas en la naturaleza y se acumulan en suelos y aguas, a veces en cantidades considerables. El carbonato de sodio existe en suelos y aguas freáticas en distintas modificaciones. Es una sal de ácido carbónico y sodio, es decir Na₂CO₃.

En los suelos se cristaliza con diferentes cantidades de agua (NaCO₃·10H₂O y NaCO₃·H₂O). Cuando el carbonato de sodio (Na₂CO₃) se hidroliza el pH de las soluciones alcanza valores de 10 a 12. Debido a su alta solubilidad (178 g L⁻¹) y alcalinidad, es muy tóxico para las plantas. La presencia de carbonato de sodio y de bicarbonato de sodio provoca que los sistemas coloidales de los suelos se dispersen o se pepticen, debido a los altos valores de sodio intercambiable.

El bicarbonato de sodio se caracteriza por una menor alcalinidad y toxicidad en comparación con la soda normal (Na₂CO₃). Durante la evaporación de aguas freáticas que contienen carbonatos y bicarbonatos de sodio, se precipitan y se acumulan en horizontes superficiales de los suelos, cristales de una sal doble Na₂CO₃, NaHCO₃·2H₂O o cristales puros de NaHCO₃ (Kovda, *et al.*, 1967).

Carbonato de potasio. El K₂CO₃, existe en los suelos y aguas en cantidades más pequeñas que el carbonato de sodio.

SALES DEL ÁCIDO SULFÚRICO

Las sales del ácido sulfúrico (H_2SO_4) se encuentran en grandes o pequeñas cantidades en casi todos los suelos y aguas. En suelos y aguas freáticas de estepas y desiertos, los sulfatos a veces se acumulan considerablemente. El valor agronómico o de mejoramiento de los sulfatos depende fuertemente del catión acompañante (Kovda *et al.*, 1967).

Sulfato de calcio. El sulfato de calcio (CaSO_4) o yeso es una sal que no es tóxica para las plantas, debido a que su solubilidad no es muy grande ($1.9\text{-}2.3 \text{ g L}^{-1}$).

Sulfato de magnesio. El sulfato de magnesio (MgSO_4) o Epsomita ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) es un componente típico de suelos salinos. Debido a su alta solubilidad (262 g L^{-1}) es de extrema toxicidad para las plantas. También se encuentra en aguas superficiales y en algunos lagos y sedimentos, nunca se acumula en suelos en forma pura, sino conjuntamente con otras sales solubles; en tales casos se requieren medidas radicales de mejoramiento, como lavados de suelo (Kovda, *et al.*, 1967).

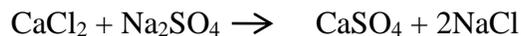
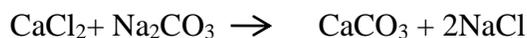
Sulfato de sodio. Es una sal de suelos salinos, aguas freáticas salinas y lagos. La toxicidad del sulfato de sodio (Na_2SO_4) es dos o tres veces menor que la del sulfato de magnesio en función de la temperatura. La mirabilita ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) fácilmente se deshidrata y se transforma a tenardita (Na_2SO_4). Por tanto, los suelos con abundancia de tenardita la acumulan en la superficie, que se hace fofa. La capa superior, de 5 a 10 cm presenta una estructura muy suelta, fofa, con granos simples, estando las partículas del suelo flocladas en granos del tamaño de arena. La superficie tiene con frecuencia una delgada costra que fácilmente se rompe y que evita que el suelo sea arrastrado por el viento (Pizarro, 1985).

Sulfato de potasio. Esta sal (K_2SO_4) carece de importancia agrícola, debido a que no se acumula en grandes cantidades en los suelos.

SALES DEL ÁCIDO CLORHÍDRICO

Los cloruros, en conjunto con los sulfatos, son los compuestos de mayor importancia en los suelos, debido a que participan en la formación de suelos salinos y aguas freáticas salinas. Todos los cloruros se caracterizan por una alta solubilidad y por ende, tienen alta toxicidad para las plantas.

Cloruro de calcio. Esta sal (CaCl_2) existe muy raras veces en los suelos, debido a que reacciona fácilmente con el carbonato y sulfato de sodio, para formar sulfato de calcio y carbonato de calcio; estas sales se precipitan en la solución del suelo de acuerdo con las reacciones siguientes:



Por eso la presencia del cloruro de calcio es característica de las soluciones de los suelos, de aguas y suelos de lagos salados, pero solamente en grados extremos de salinización (de 400-500 g L^{-1}). Esta sal también aparece en horizontes superficiales de suelos como una sal efímera, debido a reacciones de intercambio catiónico que ocurren en las soluciones ascendentes, entre el cloruro de sodio y el calcio intercambiable de los coloides del suelo.

Cloruro de magnesio. Esta sal (MgCl_2) se encuentra con mayor frecuencia en suelos salinos, aguas freáticas salinas, y lagos freáticos salinos, en comparación con el cloruro de calcio. Sin embargo, su acumulación de grandes cantidades ocurre solamente en grados máximos de salinización debido a su alta solubilidad (353 g L^{-1}); se caracteriza por su alta toxicidad y es una de las sales más nocivas para las plantas (Kovda, *et al.*, 1967).

Cloruro de sodio. El NaCl , en conjunto con el sulfato de sodio y el sulfato de magnesio es una de las sales que se encuentra con mayor frecuencia y componente constante en los suelos salinos, su alta solubilidad (264 g L^{-1}) condiciona alta toxicidad para las plantas; inclusive en contenidos de 0.1% las plantas se desarrollan anormalmente. Muchos suelos salinos contienen 2-5% de NaCl .

Cloruro de potasio. El KCl, de acuerdo con sus propiedades químicas, en general, es análogo al cloruro de sodio. Sin embargo, con frecuencia en los suelos no se encuentra ampliamente distribuido. Este aspecto se explica, por el consumo de potasio por las plantas y en gran medida, por la absorción del ión potasio por los sistemas arcillosos de los suelos. En grandes cantidades, esta sal distribuida en los suelos, su toxicidad es muy alta como la del cloruro de sodio.

3.8 Tipos geoquímicos de aguas superficiales de la corteza terrestre

En las grandes áreas bajo riego, la cantidad de agua de riego que se aplica en diferentes cultivos, por lo general, es en exceso en comparación con aquella cantidad que es necesaria para el uso consuntivo de los mismos.

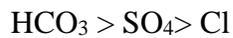
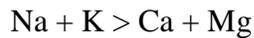
El exceso de agua drena hacia fuera de la zona de riego a través de escurrimientos superficiales o se infiltra y percola hacia los horizontes subsuperficiales de los suelos. Por lo general, estas percolaciones de agua de riego en exceso elevan los niveles freáticos de una determinada zona de riego, y por otra parte, una cantidad importante de aguas de riego que se han aplicado en exceso se drenan nuevamente hacia los cauces de ríos aguas abajo (Kovda, *et al.*, 1967).

Se debe señalar que el ciclo de desviación del agua de un río para su almacenamiento, la aplicación de agua en una zona agrícola, la percolación del agua hacia las zonas profundas de los suelos y el flujo de retorno hacia ríos aguas abajo se expresa en una cantidad grande de agua que pasa a través de una zona agrícola, lo que ocasiona la pérdida de calidad del agua para riego. En las diferentes zonas de riego en cauces de escurrimiento de agua, en regiones agrícolas aguas abajo, la calidad del agua se tornará diferente.

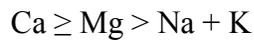
Las aguas superficiales se pueden clasificar en dos grupos: 1. Aguas que fluyen (ríos) y 2. Aguas estancadas (Lagos). Los lagos que se encuentran en las cuencas endorreicas poseen un alto contenido de sales y aguas de lagos abiertos de las zonas húmedas, que poseen una baja salinidad (Kovda, *et al.*, 1967).

Las aguas naturales, de acuerdo con las rocas que están en contacto poseen las siguientes características químicas (unidades equivalentes).

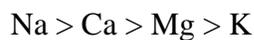
1. Aguas en contacto con rocas graníticas:



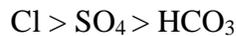
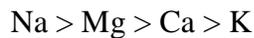
2. Aguas en contacto con rocas carbonatadas (calizas y dolomitas):



3. Aguas de acuíferos basálticos



4. Aguas de mar:



A lo largo de muchos años de estudios Kovda *et al.* (1967) estableció que existen ciertas relaciones específicas entre la cantidad de sales en aguas naturales y sus composiciones. Durante el proceso de aumento de concentración de diferentes aguas, ocurren las siguientes etapas de cambio cualitativo y cuantitativo.

- a. Aguas naturales con ciertos contenidos de silicio. Estas son de baja concentración 0.01-0.1 mg L⁻¹. Se localizan en los trópicos y en regiones forestales boreales. Contienen silicio y sustancias orgánicas.

- b. Aguas bicarbonatadas cálcicas con concentraciones de sales de 0.2-0.3 g L⁻¹.
- c. Aguas bicarbonatadas sódicas con concentraciones de 0.5-0.7 g L⁻¹.
- d. Aguas bicarbonatadas y con carbonatos sódicos con concentraciones totales de sales de 0.5-3.0 g L⁻¹. Contienen sulfatos y a veces en menor cantidad cloruros.
- e. Aguas clorhídrico-sulfáticas con algunas cantidades de soda Na₂CO₃, y con concentraciones totales de sales de 2.5-5.0 g L⁻¹.
- f. Aguas sulfático-clorhídricas con concentraciones de sales de 20.0-50.0 g L⁻¹. Por lo general no contienen carbonato de sodio en cantidades importantes.
- g. Aguas clorhídricas. Son salmueras con concentraciones de sales de 100.0-300.0 g L⁻¹ (Kovda *et al.*, 1967).

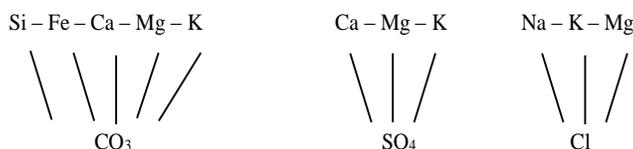
Este esquema general antes señalado, para la existencia de aguas bicarbonatadas sódicas de yacimientos subterráneos y aguas superficiales con bajas concentraciones de sales (0.3-5.0 g L⁻¹), fue establecido con base en una gran cantidad de datos hidrogeoquímicos y geoquímicos.

En general las concentraciones y composiciones de las aguas naturales superficiales que se utilizan para riego varían considerablemente en diferentes regiones del mundo.

3.9 Solubilidad de las sales en las soluciones acuosas

Las sales solubles que se encuentran en la capa intempérica del suelo y en aguas freáticas superficiales son: las sales del ácido clorhídrico, del ácido sulfúrico y las del ácido carbónico. En las rocas sedimentarias, capa del intemperismo y suelos, una gran parte de las sales se encuentra en forma cristalina y durante el humedecimiento, una parte de ellas pasa a la fase líquida y a medida que aumenta la temperatura, la solubilidad de algunas sales incrementa (NaHCO₃, K₂SO₄, Na₂SO₄ y Na₂CO₃).

La secuencia de la precipitación de las sales de una solución policomponente, depende del grado de su solubilidad. Una regularidad general de precipitación se expresa de la siguiente manera:



Las regularidades de la precipitación de sales se han estudiado ampliamente en las aguas de altos contenidos salinos. En primer lugar se precipitan los hidróxidos de silicio y fierro, después los carbonatos de calcio y magnesio, más adelante el yeso y los sulfatos de magnesio, y por último los cloruros de sodio, potasio y magnesio (Szabolcs, 1989).

3.10 Calidad del agua para riego

El concepto de calidad del agua se refiere a la característica de las aguas que pueden afectar su adaptabilidad a un uso específico y se define por sus características físicas, químicas o biológicas (Ayers y Westcot, 1987). En aguas para uso agrícola, la calidad es definida por la concentración de iones específicos, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ como cationes; CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-} como aniones, y otros de menor proporción como el B^{3+} , I^- y NO_3^- (Pizarro, 1985). Es decir, la calidad del agua para riego está determinada por la concentración y composición de los constituyentes disueltos que contenga (Richards, 1990). Estos elementos tienen su origen en la disolución o meteorización de las rocas y suelos. Son transportadas mediante corrientes tanto superficiales como subterráneas y depositadas en el suelo de forma natural o mediante el riego (Lesser, 1987).

La importancia de conocer la calidad del agua, para riego, es para poder predecir su efecto sobre el suelo y los cultivos (Richards, 1990); para esto, es necesario determinar la concentración cualitativa y cuantitativa de los iones en solución, principalmente los iones que causan toxicidad y los que dan origen a la formación de sales nocivas (Ayers y Westcot, 1987).

Criterios a evaluarse en las aguas para riego

Para evaluar la calidad del agua se toman en cuenta tres criterios: salinidad, sodicidad y toxicidad. El criterio de salinidad evalúa el riesgo de que el uso de agua ocasione altas concentraciones de sales, con el correspondiente efecto osmótico y disminución del rendimiento de cultivos. El criterio de sodicidad analiza el riesgo de que se induzca un elevado porcentaje de sodio intercambiable (PSI), con deterioro de la estructura del suelo. El criterio de toxicidad estudia los problemas que pueden crear determinados iones (Pizarro, 1985; Velázquez, 2001, Mendoza, 2009, Ayers y Wescot, 1987).

En el Cuadro 5, se presentan los lineamientos que deben observarse durante la evaluación de calidad del agua de riego. Estos lineamientos se han establecido teniendo en cuenta la experiencia de análisis de muchas fuentes de agua para riego de muchas zonas agrícolas del mundo (Ayers y Wescot, 1987; Kovda, *et al.*, 1967).

Las perspectivas de uso del agua en la agricultura deben encaminarse, hacia la evaluación de ciertos parámetros que pueden desarrollar problemas potenciales en suelos bajo riego, y en el desarrollo y crecimiento de diferentes cultivos que se explotan en la agricultura.

Cuadro 5. Lineamientos para evaluar la calidad del agua para riego.

Problema potencial	Unidades	Grado de restricción de uso		
		Ninguna	Ligera a moderada	Severa
Salinidad (afecta la disponibilidad de agua para el cultivo)				
CEa. (o)	dS.m ⁻¹	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
TSD	mg.L ⁻¹	< 450	450 – 2000	> 2000
Infiltración (reduce infiltración; se evalúa usando conjuntamente a la vez la EC y la RAS)				
RAS = 0 - 3 y CEa =		> 0.7	0.7 – 0.2	< 0.2
RAS = 3 - 6		> 1.2	1.2 – 0.3	< 0.3
RAS = 6 - 12		> 1.9	1.9 – 0.5	< 0.5
RAS = 12 - 20		> 2.9	2.9 – 1.3	< 1.3
RAS = 20 - 40		> 5.0	5.0 – 2.9	< 2.9
Toxicidad de iones específicos (afectan cultivos sensibles)				
Sodio (Na)				
Riego por superficie.	RAS	< 3.0	3.0 – 9.0	> 9.0
Riego por aspersión.	meq.L ⁻¹	< 3.0	> 3.0	
Cloro (Cl)				
Riego por superficie.	meq.L ⁻¹	< 4.0	4 -10.0	> 10.0
Riego por aspersión.	meq.L ⁻¹	< 3.0	> 3.0	
Boro (B)	meq.L ⁻¹	< 0.7	0.7 – 3	> 3.0
Varios (afectan cultivos sensibles)				
Nitrógeno (NO ₃ – N)	meq.L ⁻¹	< 5.0	5.0 -30.0	> 30.0
Bicarbonatos (HCO ₃)				
(aspersión foliar únicamente)	meq.L ⁻¹	< 1.5	1.5 – 8.5	> 8.5
pH	Amplitud Normal		6.5 – 8.4	

*Cl/SO₄ > Halofitismo, Suculencia

*Cl/SO₄ < Leñosidad, Xerofitismo

*HCO₃/Cl + SO₄ > Viscosidad de las paredes celulares

Fuente: Ayers y Westcot, 1987.

*Velázquez, 2001.

3.11 Criterios de salinidad

La salinidad es la concentración de sales minerales presentes y disueltas en las aguas de riego y en las soluciones de suelos sobre una base de volumen o peso. Los solutos más comunes que comprenden las sales minerales disueltas son los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y los aniones CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} y se considera algunas veces el ion nitrato NO_3^- . También se señalan otros constituyentes que contribuyen a la salinidad en las aguas y en las soluciones de suelos hipersalinos y estas incluyen: B^{3+} , Sr^{2+} , Li^+ , SO_3^{2-} , Rb^+ , F^- , Mn^{2+} , Ba^{2+} y Al^{3+} .

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es uno de los índices más frecuentes que analiza el riesgo de salinidad, basándose en la concentración de sales del agua de riego (Richards, 1973). Casi todas las aguas para riego que se han usado por mucho tiempo tienen una conductividad eléctrica menor a $2250 \mu\text{S cm}^{-1}$. Para fines de diagnóstico y de clasificación de las aguas de riego de acuerdo con su conductividad eléctrica, se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- 1) Aguas de baja salinidad (C1): $\text{CE} < 250 \mu\text{S cm}^{-1}$. Son satisfactorias para el riego por lo que respecta a la concentración de sales.
- 2) Aguas de salinidad media (C2): $\text{CE } 250 - 750 \mu\text{S cm}^{-1}$. Los cultivos sensibles pueden ser afectados de manera adversa.
- 3) Aguas altamente salinas (C3): $\text{CE } 750 - 2250 \mu\text{S cm}^{-1}$. Se obtiene un rendimiento adecuado de las plantas, siempre y cuando se haga un buen manejo de los suelos y se cuente con drenaje eficiente, sin embargo, si el lavado y drenaje no son adecuados se presentarán condiciones de salinidad.
- 4) Aguas muy altamente salinas (C4): $\text{CE} > 2250 \mu\text{S cm}^{-1}$. El empleo de esta agua es una excepción y en pocas ocasiones se tienen buenas cosechas. Únicamente los cultivos más tolerantes a las sales se pueden desarrollar bien.

Índice de salinidad efectiva

Este índice estima el peligro que pueden producir las sales solubles del agua al formar parte de la solución del suelo, es decir, que al sustraerse de la concentración total, los carbonatos de calcio, magnesio y los sulfatos de calcio se precipitan en el momento en que el agua de riego pasa a formar parte de la solución del suelo. Este proceso es más notable cuando las aguas tienen un contenido alto de carbonatos y bicarbonatos (Doneen, 1958).

La salinidad efectiva se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Si } \text{Ca}^{2+} > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$$

Entonces:

$$\text{SE} = \text{suma de cationes} - (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$$

$$\text{Si } \text{Ca}^{2+} < (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}); \text{ pero } \text{Ca}^{2+} > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$$

Entonces:

$$\text{SE} = \text{Suma de cationes} - \text{Ca}^{2+}$$

$$\text{Si } \text{Ca}^{2+} < (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-); \text{ pero } (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$$

Entonces

$$\text{SE} = \text{suma de cationes} - (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$$

$$\text{Si } (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) < (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$$

Entonces:

$$\text{SE} = \text{suma de cationes} - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

Dónde: Todos los iones están expresados en $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$.

Los valores recomendados de acuerdo al índice de salinidad efectiva (Doneen, 1958), se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con su salinidad efectiva.

Clase	Salinidad Efectiva (mmol _c L ⁻¹)
Buena	< 3
Condicionada	3 a 15
No recomendable	> 15

Fuente: Doneen, 1958

Índice de salinidad potencial

Este índice determina la cantidad de Cl⁻ y SO₄²⁻ que puede ser perjudicial a los cultivos debido al incremento de la presión osmótica de la solución del suelo. Los cloruros y sulfatos son sales que se quedan en la solución del suelo, cuando la humedad aprovechable por las plantas es <50% (Doneen, 1958). La fórmula para determinar la salinidad potencial es la siguiente:

$$SP = Cl^{-} + \frac{1}{2}SO_4^{2-}$$

Dónde: Las concentraciones de estos iones están expresadas en mmol_c L⁻¹.

En el Cuadro 7, se presenta la clasificación de las aguas de acuerdo al índice de salinidad potencial (Doneen, 1958).

Cuadro 7. Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con su salinidad potencial.

Clase	Salinidad Potencial (mmol _c L ⁻¹)
Buena	< 3
Condicionada	3 a 15
No recomendable	> 15

Fuente: Doneen, 1958.

3.12 Criterios de Sodicidad

Con respecto al contenido de sodio en las aguas de riego; las aguas se clasifican utilizando la relación de adsorción de sodio o RAS (Figura 1). Esta clasificación de las aguas de riego, se basa principalmente en el efecto que tiene el ión sodio adsorbido, sobre las condiciones físicas de los suelos (Richards, 1973).

Aguas bajas en sodio (S1). Pueden utilizarse para riego agrícola en la mayoría de los suelos, con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. Aunque no

obstante, los cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

Aguas medias en sodio (S2). En suelos de composición mecánica fina, el sodio representa un peligro considerable, y más aún, si dichos suelos poseen una alta capacidad de intercambio de cationes, y especialmente bajo condiciones de lavado deficiente, a menos que el suelo contenga yeso. Estas aguas solo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad.

Aguas con altos contenidos de sodio (S3). Estas aguas pueden producir niveles altos de sodio intercambiable en la mayoría de los suelos, por lo que éstos necesitarán prácticas especiales de manejo, es decir, buen drenaje, fácil lavado y suficientes adiciones de materia orgánica. Probablemente los suelos yesíferos desarrollarán niveles perjudiciales de sodio intercambiable, cuando se riegan con este tipo de aguas. Puede requerirse el uso de mejoradores químicos para sustituir al sodio intercambiable, sin embargo, tales mejoradores no serán económicos si se usan aguas de muy alta salinidad.

Aguas con muy altos contenidos de sodio (S4). Estas aguas son inadecuadas para riego, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio del suelo o la aplicación de yeso u otros mejoradores no sobrepase el umbral económico el empleo de esta clase de aguas.

Para una clasificación de las aguas de riego, se utiliza ampliamente el Diagrama de Richards, (1973) que relaciona fundamentalmente la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de las aguas de riego, y la adsorción de sodio RAS de dichas aguas. En la Figura 1, se presenta el diagrama de Richards, (1973).

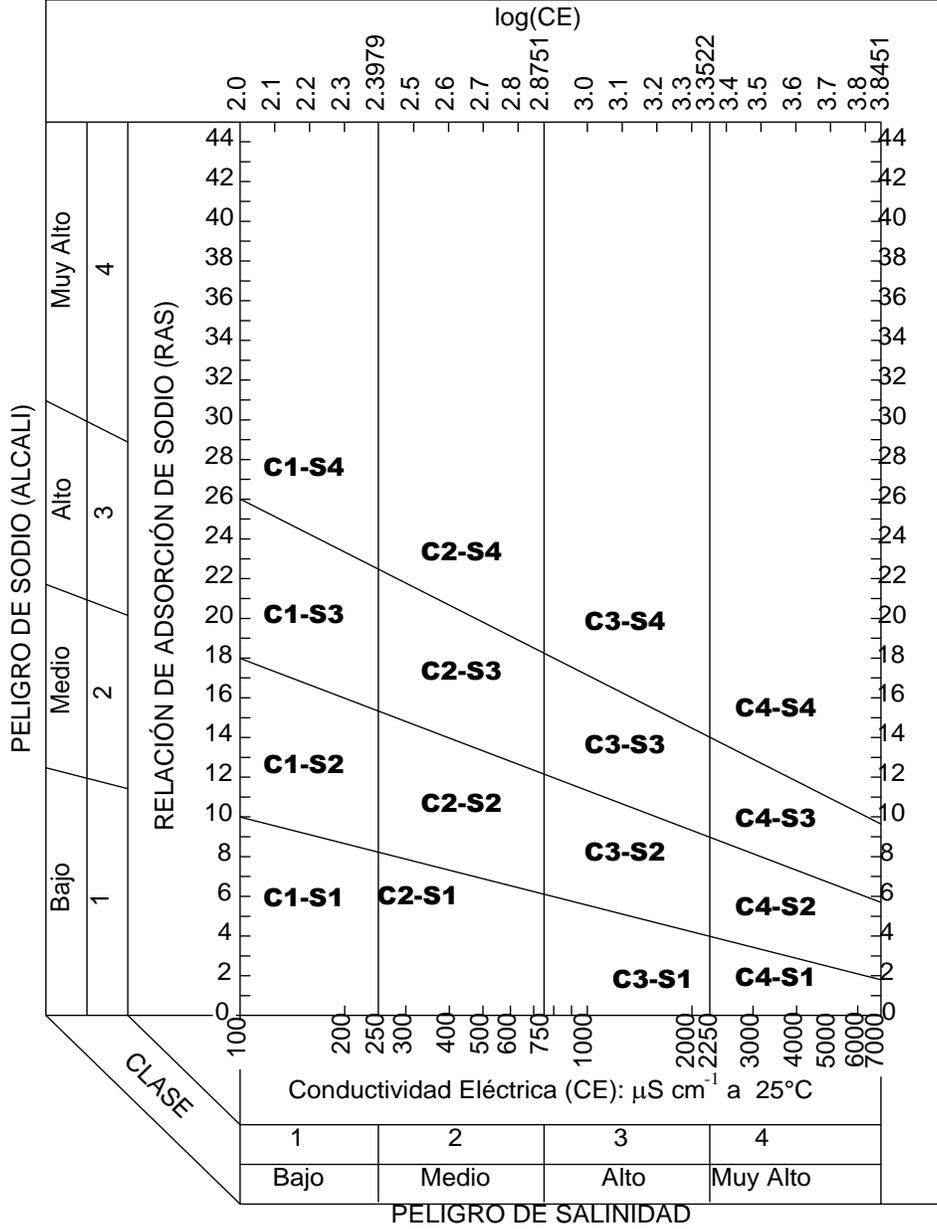


Figura 1. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego (Richards, 1973).

Ecuación para el cálculo del porcentaje de sodio intercambiable

Puesto que se han señalado las evaluaciones se basan en el contenido del sodio intercambiable en los suelos. Un parámetro de evaluación de la posibilidad de uso de una determinada agua de riego es el nivel en que el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) se encontrará en el suelo, debido a procesos de adsorción de sodio de las aguas de riego por el complejo de intercambio catiónico de los suelos. Por consiguiente, cualquier posible evaluación del peligro potencial de la sodicidad de un agua de riego, deberá relacionarse con el PSI, que tendrá que encontrarse en el suelo derivado del uso de las aguas de riego. El PSI significa el porcentaje de cargas negativas utilizadas u ocupadas con iones de sodio y en un suelo puede ser estimado de la RAS mediante la siguiente ecuación:

$$\text{PSI} = \frac{(\text{K} \times \text{RAS})}{1 + (\text{K} \times \text{RAS})} \times 100$$

Esta la ecuación para calcular el PSI de un suelo conociendo la RAS de un agua de riego determinada en condiciones de equilibrio y saturación del suelo.

Richards (1973) propone una ecuación para calcular el PSI mediante coeficientes gráficos, obtenidos al relacionar el PSI con la RAS.

$$\text{PSI} = \frac{100 (-0.0126 + 0.01475\text{RAS})}{1 + (-0.0126 + 0.01475\text{RAS})}$$

Esta ecuación empírica se basa en que una vez determinada la RAS de una agua para riego se puede estimar el valor del PSI en un suelo, bajo el supuesto que exista un equilibrio entre la solución del suelo con el agua de riego. Sin embargo, es de esperarse que esta condición no se presente con frecuencia en el campo, porque la solución del suelo casi siempre posee mayor concentración que el agua para riego.

Ecuación para el cálculo de la relación de adsorción de sodio original

Como se ha citado, existe una relación de proporcionalidad entre los valores de los parámetros RAS y PSI en las aguas de riego. Pues los valores de RAS se refieren a la cantidad de sodio adsorbido en el complejo de intercambio del suelo, como resultado de la aplicación de un agua con un determinado contenido de sodio. Por lo que, este parámetro se ha utilizado con muchas ventajas para hacer un excelente diagnóstico de los problemas de sodicidad en los suelos, en lugar de la determinación directa del sodio intercambiable. El RAS original se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{RAS} = \frac{C_{\text{Na}^+}}{\sqrt{\frac{C_{\text{Ca}^{2+}} + C_{\text{Mg}^{2+}}}{2}}}$$

Donde Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} se refieren a las concentraciones de los cationes solubles expresados en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$.

La formulación de RAS no contempla las diferencias físico-químicas esenciales de los iones polivalentes de Ca^{2+} y Mg^{2+} . El radio iónico del Na^+ es de 0.098, el del Ca^{2+} es de 0.104 y el del Mg^{2+} es de 0.074 nm. Los números de hidratación en moles de H_2O /mol de electrolitos son: para el ion $\text{Na}^+ = 16.2$, para el $\text{Ca}^{2+} = 16.7$ y para el $\text{Mg}^{2+} = 18.9$. De aquí se deriva que los procesos de hidrólisis de estos iones se manifiestan con diferente intensidad. Esta es la razón por la que el valor de la RAS sufre variaciones debido a la dilución, es decir, cuando la solución se diluye su RAS disminuye. Esta formulación supone que el Ca y el Mg tienen la misma selectividad de intercambio, que no es correcto; para un mismo RAS, la adsorción de Na crece al aumentar la relación Mg/Ca debido a la menor energía de enlace del Mg. Por otra parte, no se consideran las variaciones de las concentraciones del ion Ca^{2+} debido a su precipitación en condiciones de alcalinidad elevada, $\text{pH} > 8.2$. Precipitación que se presenta para el Ca en forma de CaCO_3 y CaSO_4 .

Ecuación para el cálculo de la relación de adsorción de sodio ajustada

Por su parte Bower *et al.*, 1968, sus estudios establecieron una modificación a los valores originales o explícitos de la RAS de las aguas que se utilizan para riego. Estos nuevos valores del índice RAS se conocen como RAS ajustada (RAS_{aj}).

$$RAS_{aj} = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}} [1 + (8.4 - pH_c)]$$

Dicha fórmula toma en cuenta la formación de precipitados en forma de CaCO₃ y que incluye las disponibilidades de calcio en condiciones de una alcalinidad determinada. Donde pH = 8.4, es aproximadamente el pH de un suelo no sódico en equilibrio con el carbonato de calcio CaCO₃ (Bower y Maasland, 1963). El índice de saturación estima la precipitación del CaCO₃ cuando alcanza su límite de saturación en presencia de iones bicarbonato (Langelier, 1936). Este índice se define por la diferencia entre el pH del agua (pHa) establecido como 8.4 y el pH teórico que el agua alcanzaría en equilibrio con el CaCO₃ (pHc).

Este índice se calcula mediante la ecuación propuesta por Langelier (1936) e indica la magnitud con que el agua fluye en un sistema cerrado, (sin pérdida de CO₂) precipitando o diluyendo CaCO₃. El índice de saturación se calcula como sigue:

$$IS = (8.4 - pH_c)$$

Los valores positivos de este índice indican que el CaCO₃ precipitará del agua, mientras que valores negativos indican que el agua solubilizará CaCO₃. La ecuación de Langelier para el cálculo del pHc es:

$$pH_c = (pK_2' - pK_c') + p(Ca) + p(Alk)$$

En donde:

pK₂' = Es el logaritmo negativo de la segunda constante de disociación del ácido carbónico (H₂CO₃), corregido por la fuerza iónica.

pK_c' = Es el producto de solubilidad del CaCO₃, corregido por la fuerza iónica.

pCa = Corresponde al logaritmo negativo de la concentración molal de Ca.

$p(\text{Alk})$ = Corresponde al logaritmo negativo de la concentración equivalente de la base titulable de CO_3 y HCO_3 .

Los valores de pK_2' - pK_c' se basan en la siguiente ecuación, los últimos términos que se presentan están corregidos por la fuerza iónica de Debye-Hückel (μ):

$$pK_2' - pK_c' = 2.0269 + 0.5092 \left[\frac{4(\mu)^{\frac{1}{2}}}{1 + 2(\mu)^{\frac{1}{2}}} + \frac{(\mu)^{\frac{1}{2}}}{1 + 1.45(\mu)^{\frac{1}{2}}} \right]$$

El número 2.0269 es la diferencia entre pK_2' y pK_c' , usando $K_2 = 4.7 \times 10^{-11}$ y $K_c = 5.0 \times 10^{-9}$ como valores numéricos constantes. La fuerza iónica y la concentración total de cationes de las aguas naturales están altamente correlacionadas. Para calcular la fuerza iónica se utiliza la siguiente ecuación:

$$1000 \mu = 1.3477C + 0.5355$$

Donde C es la concentración total de cationes en $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$.

Esta formulación de RAS no toma en cuenta la posible precipitación del sulfato de calcio (CaSO_4) y además hace equivalentes, en sus propiedades físico-químicas a los iones Ca y Mg.

Ecuación para el cálculo de la relación de adsorción de sodio corregida

En cambio Suárez 1981, recomienda un nuevo procedimiento para el cálculo de la relación de adsorción de sodio, la RAS corregida (RAS°); que conjuntamente con el valor de Ca° ofrece una mejor comprensión de las modificaciones del calcio en la solución del suelo, dando lugar a un aumento en su contenido, provocado por la disolución del calcio de los carbonatos y silicatos, o a una disminución del mismo, ocasionado por la precipitación del calcio en forma de carbonato.

Esta formulación ajusta la concentración del calcio, en el agua, al valor de equilibrio esperado después del riego e incluye, además, los efectos del dióxido de carbono (CO_2), del ión bicarbonato (HCO_3^-) y de la salinidad, sobre el calcio originalmente contenido en el agua de riego y que no forma parte de la solución del suelo. Este procedimiento supone la existencia de una fuente de calcio en el suelo, como la caliza (CaCO_3) u otros minerales como los

silicatos y la inexistencia de precipitación del magnesio. La RAS° puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$\text{RAS}^\circ = \frac{C_{\text{Na}^+}}{\sqrt{\frac{C_{\text{Ca}^\circ} + C_{\text{Mg}^{2+}}}{2}}}$$

Donde:

Na = Contenido de sodio en el agua de riego, mmol_c L⁻¹

Ca° = Contenido corregido de calcio en el agua de riego, mmol_c L⁻¹

Mg = Contenido de magnesio en el agua de riego, mmol_c L⁻¹

El valor de Ca° representa el contenido de calcio en el agua de riego, corregido por la salinidad del agua (CEa), por el contenido de iones bicarbonato en relación a su propio contenido de calcio (HCO₃⁻/Ca²⁺) y por la presión parcial del dióxido de carbono (CO₂) ejercida en los primeros milímetros del suelo (P = 0.0007 atm). Cada uno de los valores del Cuadro 8, representan la concentración final del calcio que permanecería en solución en el suelo, como resultado de aplicar un agua de determinada salinidad (CEa) y contenido relativo de bicarbonatos en su relación con el calcio (HCO₃⁻/Ca²⁺).

Cuadro 8. Concentración de Ca° en la solución del suelo, cerca de la superficie, que resultaría de regar con aguas de determinado valor de $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ y CE del agua de riego.^{1,2,3}

	Salinidad del agua aplicada (CEa) en $\mu\text{S cm}^{-1}$											
	100	200	300	500	700	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000
0.05	13.20	13.61	13.92	14.40	14.79	15.26	15.91	16.43	17.28	17.97	19.07	19.94
0.10	8.30	8.57	8.77	9.07	9.31	9.62	10.02	10.35	10.89	11.32	12.01	12.56
0.15	6.34	6.54	6.69	6.92	7.11	7.34	7.65	7.90	8.31	8.64	9.17	9.58
0.20	5.24	5.40	5.52	5.71	5.87	6.06	6.31	6.52	6.86	7.13	7.57	7.91
0.25	4.51	4.65	4.76	4.92	5.06	5.22	5.44	5.62	5.91	6.15	6.52	6.82
0.30	4.00	4.12	4.21	4.36	4.48	4.62	4.82	4.98	5.24	5.44	5.77	6.04
0.35	3.61	3.72	3.80	3.94	4.04	4.17	4.35	4.49	4.72	4.91	5.21	5.45
0.40	3.30	3.40	3.48	3.60	3.70	3.82	3.98	4.11	4.32	4.49	4.77	4.98
0.45	3.05	3.14	3.22	3.33	3.42	3.53	3.68	3.80	4.00	4.15	4.41	4.61
0.50	2.84	2.93	3.00	3.10	3.19	3.29	3.43	3.54	3.72	3.87	4.11	4.30
0.75	2.17	2.24	2.29	2.37	2.43	2.51	2.62	2.70	2.84	2.95	3.14	3.28
1.00	1.79	1.85	1.89	1.96	2.01	2.09	2.16	2.23	2.35	2.44	2.59	2.71
Valor de $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$												
1.25	1.54	1.59	1.63	1.68	1.73	1.78	1.86	1.92	2.02	2.10	2.23	2.33
1.50	1.37	1.41	1.44	1.49	1.53	1.58	1.65	1.70	1.79	1.86	1.97	2.07
1.75	1.23	1.27	1.30	1.35	1.38	1.43	1.49	1.54	1.62	1.68	1.78	1.86
($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$) 2.00	1.13	1.16	1.19	1.23	1.26	1.31	1.36	1.40	1.48	1.58	1.63	1.70
2.25	1.04	1.08	1.10	1.14	1.17	1.21	1.26	1.30	1.37	1.42	1.51	1.58
2.50	0.97	1.00	1.02	1.06	1.09	1.12	1.17	1.21	1.27	1.32	1.40	1.47
3.00	0.85	0.89	0.91	0.94	0.96	1.00	1.04	1.07	1.13	1.17	1.24	1.30
3.50	0.78	0.80	0.82	0.85	0.87	0.90	0.94	0.97	1.02	1.06	1.12	1.17
4.00	0.71	0.73	0.75	0.78	0.80	0.82	0.86	0.88	0.93	0.97	1.03	1.07
4.50	0.66	0.68	0.69	0.72	0.74	0.76	0.79	0.82	0.86	0.90	0.95	0.99
5.00	0.61	0.63	0.65	0.67	0.69	0.71	0.74	0.76	0.80	0.83	0.88	0.93
7.00	0.49	0.50	0.52	0.53	0.55	0.57	0.59	0.61	0.64	0.67	0.71	0.74
10.00	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43	0.45	0.47	0.48	0.51	0.53	0.56	0.58
20.00	0.24	0.25	0.26	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.32	0.33	0.35	0.37
30.00	0.18	0.19	0.20	0.20	0.21	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.27	0.28

1. Suárez, 1981.
2. Supone: a) una fuente de calcio proveniente de silicatos o caliza (CaCO_3). b) no existe precipitación del magnesio. c) la presión relativa del CO_2 de la superficie del suelo es igual a 0.0007 atm.
3. Ca° y $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ están expresadas en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$.

Evaluación del agua para riego con base en el carbonato de sodio residual

Otra consideración que Richards (1973) recomienda al evaluar es la concentración de bicarbonatos con relación a la concentración de calcio más magnesio. En aguas ricas con iones bicarbonato existe la tendencia del calcio y del magnesio a precipitarse en forma de carbonatos, a medida que la solución del suelo se vuelve más concentrada. Esta reacción no se completa totalmente en circunstancias ordinarias, pero a medida que va teniendo lugar, las concentraciones de calcio y magnesio se van reduciendo, aumentando así la proporción relativa del sodio. Eaton (1950) se usa el término carbonato de sodio residual (CSR) al referirse a esta reacción.

Cuando en el agua de riego el contenido de carbonatos y bicarbonatos es mayor que el contenido de calcio y magnesio, existe la posibilidad de que se forme el carbonato de sodio, debido a que, por su alta solubilidad, puede permanecer en solución aún después de que han precipitado los carbonatos de calcio y de magnesio. El carbonato de sodio provoca la defloculación del suelo. Este índice (CSR) se calcula con la siguiente fórmula, donde todos los constituyentes iónicos se expresan en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ y los niveles de tolerancia de los cultivos se presentan en el Cuadro 9 (Anderson *et al.*, 1972).

$$\text{Carbonato de sodio residual (CSR)} = (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

Cuando la diferencia es negativa, no existe el problema y el valor de CSR puede suponerse igual a cero y cuando el valor es positivo indica que Ca y Mg precipitan como carbonatos, existiendo solo sales de sodio en la solución.

Cuadro 9. Clasificación del agua para riego de acuerdo con el CSR.

Clase de agua	Carbonato de sodio residual $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$
Buena	< 1.25
Condicionada	1.25 – 2.50
No recomendable	> 2.50

Anderson *et al.*, 1972

Evaluación de los problemas de infiltración del agua para riego en el suelo

Continuando con la evaluación de los problemas ocasionados por el sodio, se añade el problema de infiltración. Ayers y Westcot (1987) mencionan que cuando la reducción de la infiltración se debe a la calidad del agua aplicada, el problema ocurre por lo general, en los primeros centímetros del suelo, aunque ocasionalmente puede extenderse a mayores profundidades. Los problemas derivan tanto de las aguas de baja concentración así como de las de alta concentración iónica con predominio del ión sodio.

Con relación a las aguas de baja concentración iónica o baja concentración salina, al aplicarse al suelo mediante el riego, lixivian los minerales solubles, como el calcio, reduciendo su influencia sobre la estabilidad de los agregados y estructura del suelo; al respecto, Ayers y Westcot (1987) mencionan que independientemente de los valores de la relación de adsorción de sodio, las aguas de baja salinidad (conductividad por debajo de $200 \mu\text{S cm}^{-1}$) invariablemente causan problemas de infiltración. Las partículas más pequeñas de un suelo, así dispersadas, obstruyen el espacio poroso y sellan la superficie del suelo, reduciendo notablemente la infiltración (McNeal *et al.*, 1968).

Luego de la aplicación de riego, mediante la evapotranspiración, las sales menos solubles precipitan al concentrarse, quedando en predominio una fracción de las más solubles, esta es la causa que da lugar al predominio de los iones más solubles, como el sodio, en la primera capa del suelo. Para evaluar el efecto del agua de riego, sobre la infiltración, al ser aplicada al suelo mediante el riego, se usa la gráfica propuesta por Ayers y Westcot (1987), esta grafica relaciona la RAS y la CE del agua (Figura 2).

Los problemas de infiltración ocasionados por la deficiente calidad del agua, ocurren por lo general en los primeros centímetros del suelo y están ligados con la estabilidad estructural del suelo y con el contenido de sodio en relación al calcio (Ayers y Westcot, 1987).

La velocidad de infiltración de 3 mm h^{-1} es considerada baja, mientras que una infiltración por encima de 12 mm h^{-1} es relativamente alta. Además de la cantidad de agua, la infiltración está determinada por las características físicas del suelo, como la estructura, textura, grado

de compactación, contenido de materia orgánica, tipo de minerales de la arcilla y por sus características químicas, incluyendo los cationes intercambiables.

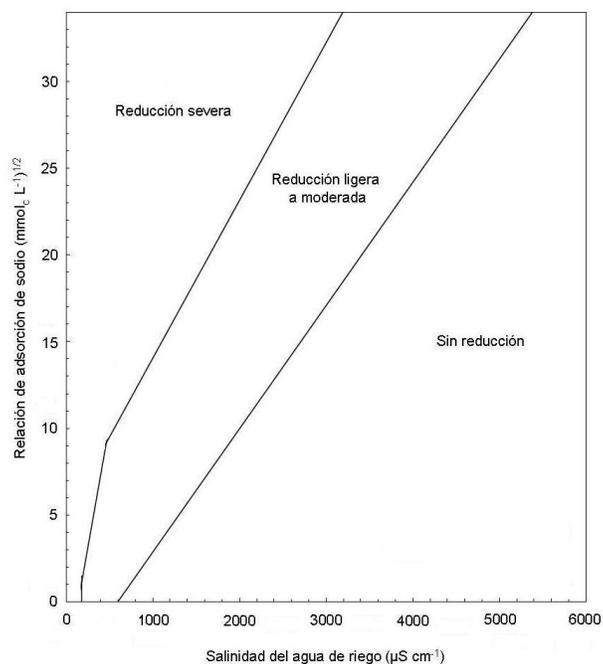


Figura 2. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio. (Ayres y Westcot, 1987).

3.13 Criterios de toxicidad

Evaluación del agua para riego con base en el contenido de Cloro

El cloro no es adsorbido por el complejo de cambio, pero se encuentra disuelto en la solución del suelo, de donde puede ser absorbido por las raíces y conducido a las hojas, donde se pueden acumular hasta niveles perjudiciales. Estos son generalmente de 0.3 a 1.0% respecto a la hoja en peso seco (Pizarro, 1985; Ayers y Westcot, 1987).

El exceso de cloro puede presentarse cuando se aplica el riego con agua residual, debido a que dicha agua normalmente recibe cloraciones antes de su uso (Seoáñez, 2005). También puede ser absorbido directamente por el follaje, cuando se riega por aspersión, en períodos de alta temperatura y baja humedad relativa.

Para clasificar el agua por el contenido de cloruro, se utilizan los datos presentes en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Clasificación de las aguas de riego de acuerdo a su contenido de cloruros.

Clasificación	Contenido de Cloruros (mmolc L ⁻¹)
Buena	<4.00
Condicionada	4.00-10.00
No recomendada	>10.00

Fuente: Ayers y Westcot, 1987

Evaluación del agua para riego con base en el contenido de boro

El boro es un microelemento esencial, para el crecimiento de las plantas en cantidades relativamente pequeñas y se vuelve tóxico cuando sobrepasa estos niveles (Ayers y Westcot, 1987). Así como niveles elevados producen daños, la deficiencia de boro también produce síntomas apreciables en muchas especies (Richards, 1973). El boro es absorbido por las raíces junto con el agua, acumulándose en las hojas y otras partes de la planta (Pizarro, 1985).

Existen suelos que contienen boro en concentraciones perjudiciales, en la mayoría de los casos de toxicidad, el boro ha sido incorporado a la solución del suelo mediante el agua de riego (Pizarro, 1985). Los problemas de toxicidad se producen, con mayor frecuencia, a causa del boro contenido en el agua de riego que por la contenida en la solución del suelo (Ayers y Westcot, 1987; Pizarro, 1985).

Las aguas superficiales rara vez contienen niveles tóxicos de boro, pero los nacimientos de agua y las aguas de pozos pueden contener concentraciones tóxicas, principalmente las que se encuentran en la cercanía de fallas sísmicas y áreas geotérmicas. Puede ser lavado del suelo, pero si desde un principio las concentraciones son elevadas, aun cuando la concentración de las otras sales se reduzca a un nivel de relativa seguridad, puede quedar en el suelo una cantidad suficiente de boro que cause problemas a las plantas (Richards, 1973). El contenido de boro en las aguas de riego se expresa en mg L⁻¹ y los valores de tolerancia establecidos por Wilcox en 1948, citado por Thorne y Peterson (1949), se presentan en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Límites permisibles de boro en mg L^{-1} , establecidos por Wilcox en 1948, para diferentes clases de aguas de riego.

Clase de agua	Grupo de cultivos		
	Sensibles	Semitolerantes	Tolerantes
Excelente	< 0.33	< 0.67	< 1.00
Buena	0.33-0.67	0.67-1.33	1.00-2.00
Aceptable	0.67-1.00	1.33-2.00	2.00-3.00
Insegura	1.00-1.25	2.00-2.50	3.00-3.75
No recomendable	> 1.25	> 2.50	> 3.75

Evaluación del agua para riego con base en el contenido de fósforo

El fósforo es un macroelemento esencial para las plantas. Su importancia en fisiología es extraordinaria como elemento plástico y funcional, imprescindible en la formación, crecimiento y multiplicación de los órganos de las plantas. Es absorbido por la planta en forma de ortofosfatos.

En las directrices para interpretar la calidad de las aguas para riego, Ayers y Westcot (1987) señalan que el contenido de fósforo en aguas de riego normalmente aceptable es de 0.0 a 2.0 mg L^{-1} .

Evaluación del agua para riego con base en el contenido de Sulfatos

Junto con los cloruros, los sulfatos son los principales aniones presentes en las aguas y son importantes en suelos salinos, pero su control se efectúa adecuadamente considerando volúmenes extra de agua en riegos para asegurar su salida fuera de la zona radical.

Las plantas pueden presentar sensibilidad a concentraciones altas de sulfatos ya que puede limitar la absorción del sodio y alterar el balance catiónico óptimo dentro de la planta, tal sensibilidad se encuentra relacionada con la tendencia de las altas concentraciones de sulfatos a limitar la absorción de calcio por las plantas.

Con la disminución de calcio, se encuentran asociados los incrementos en la absorción de sodio y potasio, de tal manera que los efectos de la alta concentración de sulfatos en el sustrato pueden estar relacionados a una alteración del balance catiónico óptimo dentro de la planta (Richards, 1973).

Evaluación del agua para riego con base en el contenido de Nitratos

El nitrógeno contenido en el agua de riego se encuentra disponible para las plantas, por lo tanto debe considerarse como parte integral del nitrógeno total requerido por los cultivos y del programa de fertilización.

Por su parte, el agua de riego puede contener niveles excesivos de nitrógeno para ciertos cultivos sensibles, los cuales en este caso presentarán un mayor crecimiento vegetativo que provocará un retraso en la maduración y baja calidad del producto (Ayers y Westcot, 1987).

Evaluación del agua para riego con base en el contenido de Silicio

El silicio es el segundo elemento más abundante del planeta y se encuentra en la mayoría de las aguas. Es el constituyente común de las rocas ígneas, el cuarzo y la arena. El silicio existe normalmente como óxido (como SiO_2 en la arena y como silicato SiO_3^{2-}). Puede estar en forma insoluble, soluble y coloidal.

Muchas aguas naturales contienen menos de 10 mg L^{-1} de silicio, algunas pueden llegar a contener hasta 80 mg L^{-1} . Las aguas volcánicas lo contienen en abundancia. El análisis del Silicio en el agua, es de gran importancia para evitar la formación de depósitos duros de sílice en los suelos.

Presión osmótica

El potencial osmótico es el componente del potencial del agua, que resultante de la presencia de partículas de soluto y es equivalente a la presión osmótica en concepto, pero de signo opuesto. El potencial osmótico puede ser expresados en términos de presión (Ramírez, 1988).

Para el cálculo de la presión osmótica se tiene la siguiente ecuación que resulta de la combinación de la ley de Boyle, ley de Charles y la ley de Avogadro (Chang, 2007).

$$\pi V = nRT$$

Dónde:

π = Presión osmótica (atm)

n = Concentración de la solución (mol)

R = Constante general de los gases (L atm mmol⁻¹/K mol)

T = Temperatura absoluta (°K)

V = Volumen ocupado (L)

Al despejar π , la ecuación queda como sigue: $\pi = \left(\frac{n}{V}\right) RT$. En donde n/V es igual a moles por litro y esto es igual a la concentración (c), por lo tanto, la presión osmótica se puede expresar en unidades de concentración:

$$\pi V = cRT$$

En esta ecuación c es la molaridad de la disolución (Benson, 2007; Valencia y Garín, 2007). Richards (1973), en base a datos experimentales del personal de laboratorio de los Estados Unidos de Norteamérica, propone la siguiente ecuación para la estimación de la presión osmótica.

$$\pi = 0.36 CE$$

Donde:

π = Presión osmótica (atm)

CE = Conductividad eléctrica (dS m⁻¹)

La presión osmótica de una solución diluida es una propiedad coligativa directamente proporcional a la concentración de solutos de una solución (Castillo, 2003); por lo tanto, se puede establecer una igualdad entre la concentración total de sólidos solubles y la presión osmótica, y obtener una ecuación que nos permita estimar con mayor confiabilidad la presión osmótica.

$$\pi = 0.36 CE$$

$$STD = 640 CE$$

$$CE = \pi/0.36$$

$$CE = STD/640$$

Estableciendo la igualdad tenemos:

$$CE = \pi/0.36 = STD/640$$

$$\pi = 0.36/ 640 STD$$

$$\pi = 5.625 \times 10^{-04} STD$$

Donde:

π = Presión osmótica (atm)

CE = Conductividad eléctrica (dS m⁻¹)

STD = Sólidos totales disueltos (mg L⁻¹)

3.14 Clasificación hidrogeoquímica

Los estudios hidroquímicos o hidrogeoquímicos sirven para determinar el origen de la composición química de las aguas y la relación entre el agua y la constitución química de las rocas (Zaporozec, 1972). Los diagramas triangulares son los ideales para presentar tres componentes y el más usual es el diagrama de Piper (1944). Para esto es necesario que los contenidos de los iones estén en porcentaje y sólo permiten reunir a tres aniones y/o tres cationes. A cada vértice corresponde el 100% de un anión y/o catión. La forma más usual es el porcentaje de los valores en mmol_c L⁻¹. Los iones representados en este diagrama son: como aniones, HCO₃⁻ + CO₃²⁻, SO₄²⁻, Cl⁻ y como cationes Na⁺ + K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺.

En general, si los análisis químicos de las muestras de agua se agrupan en una sola zona del diagrama, todas pertenecen a una misma familia, si sucede lo contrario, se puede inferir que existe la posibilidad de alguna otra fuente o acuífero. Se denomina familia a las aguas que ha atravesado por las mismas formaciones geológicas (Martínez *et al.*, 2006).

La utilidad de estos diagramas es la posibilidad de representar muchos análisis en un mismo gráfico, sin dar origen a confusiones. Las aguas químicamente semejantes se encontrarán agrupadas, y pueden clasificarse por su ubicación en el diagrama según el siguiente esquema (Figura 3):

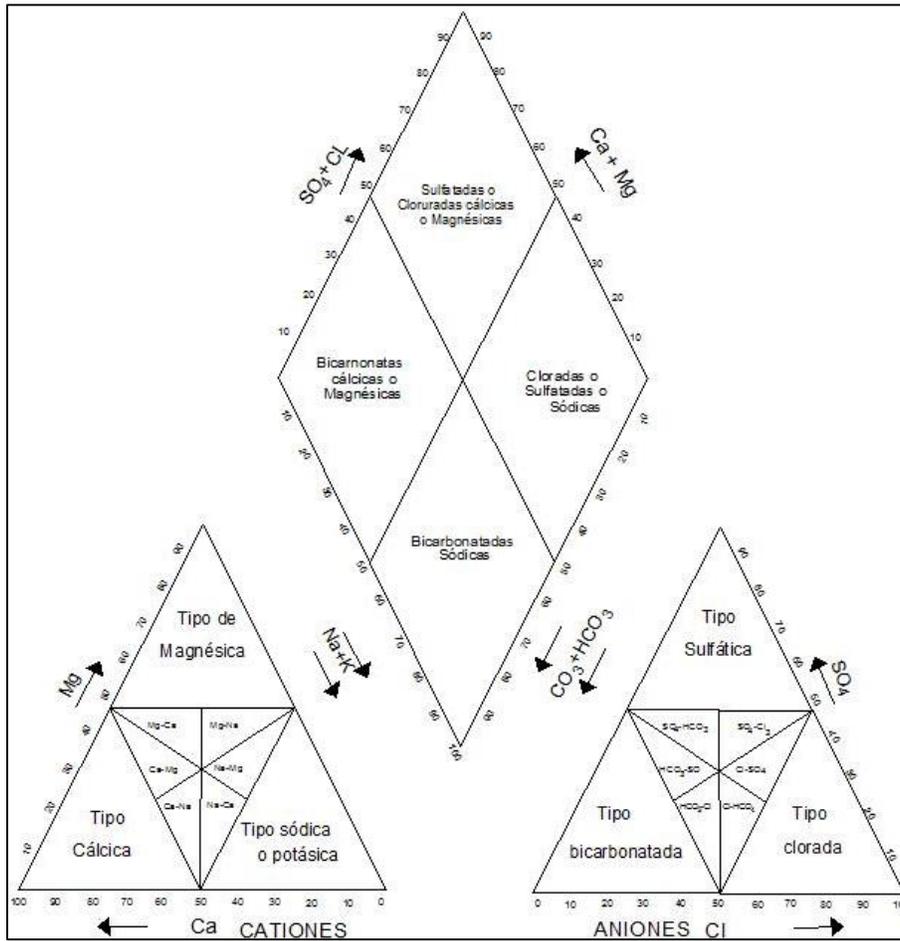


Figura 3. Diagrama triangular para representar resultados de estudios de química del agua (Piper, 1944).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Descripción del área de estudio

La zona de estudio se encuentra en una porción de los estados de Tlaxcala, Puebla y parte de Veracruz. Siendo gran mayoría de las muestras de ríos y manantiales para uso de riego agrícola y de usos doméstico así como recreativo.

Iniciando en Tlaxcala con la presa Francisco Villa, y la presa de Nanacamilpa continuando en Puebla con los afluentes del río Atoyac, siguiendo con la presa Manuela Ávila Camacho, parte de los manantiales de Atotonilco, así como la zona de las salinas en el municipio de Zapotitlán salinas, por este estado continuamos en la zona de los algos cráteres y para finalizar con este recorrido en Veracruz: río blanco, metlac, pescado y de los reyes.

Las coordenadas geográficas del área de estudio son 18° 18' hasta 19° 37' de latitud norte y 96° 49' hasta 98° 38' de longitud Oeste. Los ríos y manantiales que se muestrearon se encuentran a una altitud de 525 m hasta los 2683 m.

MARCO FISICO

Estado de Tlaxcala

El estado de Tlaxcala se localiza en la parte centro-oriental del país entre las coordenadas 19° 44' y 19° 06' de latitud Norte y 97° 43' - 98° 46' de longitud Oeste. Limita en su mayor parte con Puebla al norte, este y sur, al oeste con el Estado de México y al noroeste con Hidalgo. Tlaxcala se encuentra en la región del Eje Neovolcánico, que atraviesa como un cinturón la parte central de México. En el paisaje se distinguen volcanes y sierras volcánicas de todos tipos y tamaños, llanos extensos que una vez fueron lagos rodeados de montañas y bosques, pastizales y matorrales de clima templado que caracterizan al estado de Tlaxcala (INEGI, 2014).

Estado de Puebla

El estado de Puebla se encuentra ubicado al sureste del Altiplano de la República Mexicana, entre la Sierra Nevada y al oeste de la Sierra Madre Oriental tiene la forma aproximada de

un triángulo isósceles cuyo vértice apunta hacia el norte y la base hacia el sur; se encuentra entre los paralelos 17° 52' - 20° 52' de latitud Norte y los 96° 43' y 99° 04' de longitud Oeste; está limitado al norte con Veracruz, al sur con Oaxaca y Guerrero; al oeste con Morelos, Estado de México, Tlaxcala e Hidalgo y al este con Veracruz (INEGI, 2014).

Estado de Veracruz

El estado de Veracruz se encuentra ubicado entre la Sierra Madre Oriental y el Golfo de México, en las coordenadas 17° 03' 18" y los 22° 27' 18" de latitud Norte y los 93° 36' 13" y los 98° 36' 00" de longitud Oeste. Limita al Norte con el estado de Tamaulipas, al este con el Golfo de México, al sureste con los estados de Tabasco y Chiapas, al sur y suroeste con el Estado de Oaxaca, al oeste con el estado de Puebla, al noroeste con los estados de San Luis Potosí e Hidalgo. Tiene una superficie de 72,410.05 km², cifra que representa un 0.32% del total del territorio de la República Mexicana. (INEGI, 2014).

GEOLOGÍA

El presente apartado se realizó con la revisión de: López (1981); López (1985); Morales (1990); INEGI (2014) y Padilla (2007).

Geología de Tlaxcala

Predominan los afloramientos de rocas volcánicas como las andesitas, las riolitas, los basaltos, las tobas y las brechas volcánicas; así como diversas asociaciones de éstas. Además, hay sedimentos lacustres, fluviales y fluvio-glaciares (brechas sedimentarias). El estado de Tlaxcala está comprendido, en su totalidad, dentro de la provincia fisiográfica denominada Eje Neovolcánico; por lo que su geología ha sido moldeada por una actividad volcánica, la cual le ha dado al relieve un perfil característico.

Geología de Puebla

La naturaleza geológica del territorio poblano es variada y bastante compleja, especialmente en su porción sur, donde se encuentran terrenos metamórficos con edades del Precámbrico, Paleozoico y Mesozoico, los cuales se hallan yuxtapuestos y limitados por grandes zonas de falla. Las rocas que los forman han sido afectadas por varias fases de metamorfismo y

deformación a lo largo del tiempo geológico, y aún no existe la información suficiente para establecer un modelo evolutivo totalmente satisfactorio que explique las peculiaridades del sur de México.

Además Puebla cuenta con un gran potencial geotérmico, dado que gran parte de su territorio, forma parte de la Provincia geológica de la Faja Volcánica Transmexicana, o Eje Neovolcánico. El vulcanismo reciente en esta región, ha generado numerosos aparatos volcánicos (algunos de ellos, como el Popocatepetl, están aún en actividad) y focos termales. Tal es el caso de la caldera de los Humeros, que se localiza en su mayor parte, dentro del estado de Puebla y parte de Veracruz (INEGI, 2014).

Geología de Veracruz

El estado ha quedado comprendido dentro de siete Provincias geológicas, que son: Llanura Costera del Golfo Norte, Sierra Madre Oriental, Eje Neovolcánico, Sierra Madre del Sur, Cordillera Centroamericana y Sierras de Chiapas y Guatemala; cada una de ellas con características litológicas, estructurales y geomorfológicas propias y definidas. En la figura 4, se presenta la geología histórica de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

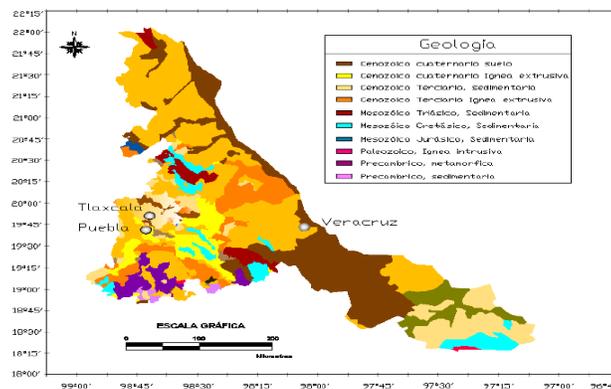


Figura 4. Geología histórica de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

HIDROGRAFÍA

Hidrografía de Tlaxcala

El estado de Tlaxcala por sus condiciones geográficas, se ubica en tres regiones hidrológicas: Cuenca del río Balsas, río Atoyac (78.76%), Cuenca del río Pánuco, río Moctezuma (18.21%) y Cuenca de Tuxpan-Nautla, río Tecolutla (3.03%). El principal río del estado de Tlaxcala es

el Zahuapán, cuerpo de agua que recorre de norte a sur pasando por el centro del estado y se une al río Atoyac.

Hidrografía de Puebla

El sistema hidrográfico de Puebla está constituido por tres vertientes; la interna, la del Golfo y la del Pacífico. La vertiente del Pacífico está formada por el río Atoyac, originado por los deshielos y corrientes del Tláloc, Telapón y Papagayo, los del Iztacihuatl, que descienden por la parte oriente, y del río Zahuapán, que se origina en Tlaxcala. Recibe como afluentes a los ríos Acateno, Atila, Amacuzac, Molinos y Cohetzala. Cruza los límites de Cholula, Puebla y Tecali; en el Cañón del Diablo forma la presa de Valsequillo o Manuel Ávila Camacho. Aquí recibe las aguas de los ríos Alseseca, Laxamilpa (Tepexi), Acatlán, (Chiautla), Tlapaneco (Coatzingo) y Huehuetlán fuera del territorio las del Nexapa, cuya corriente se debe a la gran cantidad de manantiales que recibe el Popocatepetl. En la vertiente interna están los ríos Tlapanala, Valiente y Quetzolapa en el este, y en el oeste Capulines, Cautlapanga, río Frío, Calcingo, Tlahuapán, Huepalco, San Matías, San Lucas el Verde, Santa Elena, Temizac, Zopanac, Chahuac, Prieto, Cautlanapa y Atzala.

Hidrografía de Veracruz

Por su parte, Veracruz posee una gran riqueza hidrológica. El 35 % de las aguas superficiales mexicanas atraviesa el territorio Veracruzano. Cuenta con más de 40 ríos integrados en 10 cuencas hidrológicas, entre las más importantes destacan la del río Pánuco, la del río Tuxpan-Nautla, la del río Papaloapan, la del río Coatzacoalcos y la del río Balsas.

El territorio es bajo y llano en la zona costera, y se eleva hacia el interior en la Sierra Madre Oriental. En las regiones montañosas de Veracruz los ríos forman numerosas caídas, de gran atractivo. En la figura 5, se presenta la hidrografía, en cuanto a los principales ríos de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

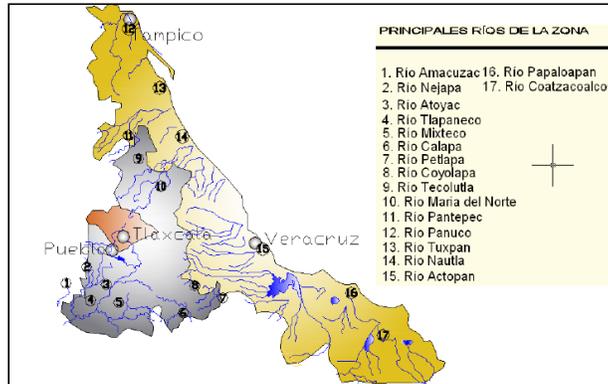


Figura 5. Hidrografía principal de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

4.2 Muestreo

La recolección de muestras de agua es una operación que requiere exclusiva atención para que la porción de agua a analizar no presente cambios químicos, biológicos o contaminación antes de su llegada al laboratorio.

Se realizó el muestreo en una sola recolección, a lo largo del recorrido de los principales ríos de los estados que abarcan la investigación; es así como la toma de muestras de agua que fueron recolectadas en campo con recipientes de plástico de 0.5 L, tomando dos muestras por sitio para luego trasladarlas al laboratorio; para su posterior análisis. Se registró en el envase la etiqueta con fecha de recolección, nombre y localización de sitio. Para el muestreo de aguas se siguieron las recomendaciones de Richards et al. (1973), APHA (1995). En la Figura 6, se presenta el recorrido en campo, iniciando en Tlaxcala y concluyendo en Puebla.



Figura 6. Ubicación de los puntos de muestreo de aguas en los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

4.3 Métodos analíticos

En el cuadro 12, se presentan los métodos analíticos para la determinación de parámetros físico-químicos que se realizaron en cada una de las muestras colectadas.

Cuadro 12. Marchas analíticas utilizadas para las determinaciones físico-químicas en aguas.

DETERMINACIÓN	MÉTODO	REFERENCIA
pH	Potenciométrico, con Potenciómetro marca Beckman, modelo Hoffman Pinther Boswork	Eaton et al., 1995
Conductividad Eléctrica	Conductimetría, mediante Conductímetro con puente de Wheastone con celda de vidrio	Richards, 1990
Residuo seco Evaporado	Gravimetría, mediante parrilla marca Hot-Plate modelo 2200 Thermolyne	Eaton et al., 1995
Sodio y potasio	Flamometría, mediante Flamómetro IL Autocal Flame Photometer 648, L=589 nm, calibrado con soluciones estándar de 140 mmol _c L ⁻¹ para Na ⁺ y de 5 mmol _c L ⁻¹ para K ⁺	APHA, 1995 3500-Na ⁺ y K ⁺ , D
Calcio y magnesio	Volumétrico, mediante titulación con EDTA y Eriocromo Negro T como indicador, para Ca + Mg y Murexida para Ca	APHA, 1995 3500 Ca ²⁺ , D
Carbonatos	Volumétrico, mediante titulación con ácido sulfúrico y Fenolftaleína como indicador	APHA, 1995 2320 B
Bicarbonatos	Volumétrico, mediante titulación con ácido sulfúrico y Anaranjado de Metilo como indicador	APHA, 1995 2320 B
Cloruros	Titulación con Nitrato de Plata y Cromato de Potasio al 5% como indicador	APHA, 1995 4500-C-IB
Sulfatos	Turbidimetría, mediante el Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35, L=420 nm	APHA, 1995 4500-SO42- E
Ortofosfatos	Espectrofotometría, mediante el Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35, L=690 nm	Rodier (1978)
Boro	Espectrofotometría, mediante el Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35, L=420 nm, Azomethina-H	Rodier, 1978; Page, 1982; Rhoades et al., 1970
Nitratos	Nitración, ácido Salicílico, Espectrofotometría, mediante el Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35, L=410 nm	Robarge et al., 1933
Silicio	Espectrofotometría, mediante el Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35, L=650 nm	APHA 1995, 4500 Si-E
Presión Osmótica	Osmómetro modelo VAPRO 5520, calibrado con optimol (100, 290 y 1000 mmol kg ⁻¹)	VAPRO, 1995

4.4 Comprobación de resultados de los análisis físico- químicos de aguas

Balance de cationes y aniones

Después de determinar la composición química de las aguas, si estos se expresan en equivalentes químicos, la suma de cationes y aniones deben ser aproximadamente iguales.

Las soluciones acuosas, como principio fundamental, son electroneutrales, es decir, se tiene una igualdad de cargas positivas y negativas ($\sum n^+ = \sum n^-$).

El porcentaje de la diferencia absoluta entre la suma de cationes y aniones se calcula con la siguiente ecuación (APHA, 1995).

$$\% \text{ diferencia} = \left| \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} \right| * 100$$

Y los criterios de aceptación de los porcentajes se presentan en el cuadro. 13:

Cuadro 13. Criterios para aceptar el porcentaje de error en el balance de cationes y aniones contenidos en el agua de riego (APHA, 1995).

Suma catión o anión (mmol _e L ⁻¹)	% Diferencia aceptable
0.0 – 3.0	± 0.20
3.0 – 10.0	± 2.00
10.0 – 800.0	± 2.0- 5.0

Sólidos totales disueltos medidos = Sólidos disueltos totales calculados

Para considerar que los análisis de las aguas son correctos, el rango de variación entre el valor de sólidos totales disueltos (STD) medidos (mg L⁻¹) y los sólidos totales calculados, este rango debe estar entre los siguientes valores:

$$1.0 < \frac{\text{STD medidos}}{\text{STD calculados}} < 1.2$$

La concentración total de sólidos totales disueltos medidos debe ser mayor al calculado, porque una contribución significativa no puede ser incluida en el cálculo. Si el valor medido es menor que el calculado, la suma mayor de iones y valores medidos no son confiables. Si el valor medido es mayor del 20% que el calculado, la suma menor de iones y sus constituyentes seleccionados deben ser analizados nuevamente.

Conductividad eléctrica medida = conductividad eléctrica calculada

En lo que se refiere a las mediciones de la conductividad eléctrica de las soluciones, y para considerar que estas mediciones son correctas, el rango de variación de la conductividad eléctrica medida y calculada en mS cm⁻¹, debe estar entre los siguientes valores.

$$0.9 < \frac{\text{CE medida}}{\text{CE calculada}} < 1.1$$

Conductividad eléctrica medida y la suma de iones

Para relacionar las mediciones de la CE y la suma de iones, cualquiera de estas sumas será en términos generales CE/100 de los valores de la conductividad eléctrica expresada en $\mu\text{S cm}^{-1}$. Para diferentes tipos de salinidad el valor se encuentra entre los siguientes rangos:

$$\frac{\text{CE}}{90} < \frac{\text{CE}}{100} < \frac{\text{CE}}{110}$$

Es decir, $100 \sum \text{aniones o } \sum \text{cationes en mmolc L}^{-1} = (0.9-1.1) \text{ CE}$.

Dónde: Las concentraciones de cationes o aniones están expresadas en mmolc L^{-1} , y la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$.

La suma de aniones o de cationes debe ser 1/100 del valor de la conductividad eléctrica medida.

Sólidos totales disueltos medidos a un rango de conductividad eléctrica

La manera de corroborar que los análisis químicos son correctos, es que, el valor numérico del cociente sólidos totales disueltos (ppm o mg L^{-1}) dividido entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) deberá ser aproximadamente 0.640. Para diferentes tipos de salinidad este valor tendrá variaciones entre 0.5-1.1.

Los valores calculados en mg L^{-1} , mmolc L^{-1} y presión osmótica de las aguas superficiales en estudio, se obtuvieron por inferencia estadística mediante regresión lineal. Ahora cuando se comparan procesos determinados experimentalmente con los procesos de ocurrencia teórica utilizando una ley fisicoquímica determinada (Richards, 1973), el ángulo de la pendiente de esta relación debe ser aproximadamente 45° .

Análisis estadístico de datos (asociación de variables)

Para establecer la dependencia funcional entre la concentración total electrolítica (mg L^{-1}), los $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ de cationes o de aniones y la presión osmótica (atm), con respecto a la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de las soluciones acuosas de las aguas.

Se calibró un modelo lineal ($Y = B_1X$) ajustado por el origen, mediante la técnica del análisis de la regresión lineal, el cual relaciona la concentración de las soluciones expresadas en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ o mg L^{-1} y la presión osmótica con respecto a la conductividad eléctrica de las aguas (Richards, 1973). Este modelo se utilizó para establecer la correlación entre la concentración total electrolítica (mg L^{-1}), los $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ de cationes o de aniones y la presión osmótica (atm) con respecto a la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de las soluciones acuosas de las aguas superficiales de estudio.

En el modelo lineal Y representa la concentración de la solución en mg L^{-1} o ppm, en un primer caso, la concentración de la solución en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ de cationes y aniones; en un segundo caso y la presión osmótica en atm desarrollada por la solución en un tercer caso, B_1 es la pendiente de la recta, es decir, el número de unidades (ppm, mg L^{-1} , $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ o atm) que aumenta la solución (Y) por cada unidad de conductividad eléctrica expresada en $\mu\text{S cm}^{-1}$ o dS m^{-1} que aumenta la misma solución; X es la conductividad eléctrica de la solución en mS cm^{-1} o $\mu\text{S cm}^{-1}$.

El ajuste del modelo se realizó al correlacionar primero la conductividad eléctrica (mS cm^{-1} o $\mu\text{S cm}^{-1}$) con la concentración de las soluciones (ppm o mg L^{-1}) luego con la concentración ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$) y finalmente con la presión osmótica (atm) empleando el método de mínimos cuadrados

V. RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados, referentes a la composición iónica y a la concentración total electrolítica de las diferentes aguas se describen desde la perspectiva de la calidad del agua para uso agrícola. La discusión de resultados analíticos obtenidos en esta investigación se basa en distintas asociaciones funcionales de variables, diagramas sintéticos específicos de interpretación y tablas de permisibilidad de contenidos de elementos.

Es así como se organizó la información para presentar este capítulo en tres apartados, considerando su importancia y su mejor discusión.

En la figura 7, se muestra el croquis de ubicación, correspondiendo a los estado de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.



Figura 7. Localización geográfica de los sitios de muestreo de los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

5.1 ZONA DE INICIO DEL MUESTREO DE LOS ESTADO DE TLAXCALA, PUEBLA Y VERACRUZ.

5.1.1 Localización geográfica de los sitios de muestreo en la zona.

En el Cuadro 14, se presenta datos de localización geográfica de los sitios de muestreo así mismo datos de temperatura tomada en campo para cada muestra colectada.

Cuadro 14. Localización de sitios de muestreo de las aguas superficiales obtenidas.

No.	Sitio de muestreo	Coordenadas		Altitud msnm	Temperatura ° C
		Latitud Norte	Longitud Oeste		
1	Bordo Santo Tomas, Méx.	19° 34' 53.4"	98° 38' 14.9"	2630	18.5
2	Laguna San Antonio, Tlax.	19° 37' 04.4"	98° 27' 02.5"	2503	19.0
3	Presa F.Villa, Tlax.	19° 35' 14.2"	98° 28' 42.5"	2530	19.0
4	Presa Nanacamilpa, Tlax.	19° 29' 15.8"	98° 31' 04.8"	2683	19.0
5	Nacimiento San Antonio Atotonilco, Tlax.	19° 22' 19.2"	98° 28' 03.1"	2323	26.0
6	Rio Atoyac-1, Pue.	19° 19' 22.0"	98° 27' 39.7"	2285	17.0
7	Rio Atoyac-2, Pue.	19° 18' 55.6"	98° 27' 42.6"	2284	21.0
8	Nacimiento-1, Exhacienda Chautla, Pue.	19° 19' 04.2"	98° 28' 28.3"	2310	16.0
9	Nacimiento-2, Exhacienda Chautla, Pue.	19° 19' 05.2"	98° 28' 28.0"	2310	15.0
10	Nacimiento-3, Exhacienda Chautla, Pue.	19° 18' 55.9"	98° 28' 22.6"	2312	15.0
11	Laguna, Exhacienda Chautla, Pue.	19° 18' 57.5"	98° 28' 15.5"	2299	22.5
12	Rio Atoyac-3, Pue.	19° 04' 07.5"	98° 14' 30.7"	2114	20.0
13	Presa Manuel Ávila Camacho, Pue.	18° 54' 45.2"	98° 06' 30.5"	2056	21.0
14	Afluente Rio Atoyac, Pue.	18° 55' 25.5"	98° 03' 41.3"	2040	19.0
15	Rio Atoyac-4, Pue.	18° 50' 35.6"	98° 01' 47.8"	1922	21.5
16	Afluente antes de puente al Rio Atoyac, Pue.	18° 50' 26.2"	98° 01' 50.2"	1931	20.5
17	Presa en el Aguacate, Pue.	18° 51' 39.0"	98° 11' 11.0"	1960	23.0
18	Rio Huehuetlan, Pue.	18° 45' 41.7"	98° 10' 34.0"	1419	25.2
19	Manantial, Atotonilco, Pue.	18° 45' 26.3"	98° 10' 27.1"	1382	27.7
20	Nacimiento-1 Balneario Atotonilco, Pue.	18° 45' 23.5"	98° 10' 29.2"	1367	34.2
21	Nacimiento-2 Balneario Atotonilco, Pue.	18° 45' 24.6"	98° 10' 32.0"	1354	32.8
22	Arroyo Huehuetlan, Pue.	18° 43' 11.4"	98° 08' 06.0"	1326	28.7
23	Manantial por Huehuetlan, Pue.	18° 43' 25.2"	98° 07' 56.9"	1330	23.5
24	Arroyo Huehuetlan - Molcajac, Pue.	18° 43' 00.0"	98° 04' 56.7"	1584	25.1
25	Rio Huehuetlan 2, Pue.	18° 44' 05.9"	97° 55' 36.8"	1661	21.3
26	Nacimiento Puente de Dios, Pue.	18° 44' 05.1"	97° 55' 32.1"	1669	19.2
27	Rio Xamilpac, Pue,	18° 36' 34.7"	97° 55' 54.2"	1575	21.1
28	Bordo Puerto del Aire Chapúlco, Puebla	18° 40' 46.9"	97° 21' 16.1"	2177	19.5
29	Rio Inicio rio blanco, Veracruz	18° 46' 49.5"	97° 12' 23.8"	1376	16.4
30	Manantial Nogales, Veracruz	18° 49' 14.3"	97° 09' 54.7"	1304	16.3
31	Laguna Ojo de Agua, Veracruz	18° 51' 50.0"	97° 04' 36.7"	1168	16.8
32	Rio del Metlac, Veracruz	18° 53' 47.4"	97° 00' 44.9"	902	19.3
33	Rio Xamapac, Veracruz	19° 06' 01.2"	97° 02' 02.0"	1350	17.5
34	Rio los Pescados, Veracruz	19° 21' 50.1"	96° 49' 32.8"	525	22.2
35	Rio de los reyes, Veracruz	19° 20' 32.7"	97° 05' 51.0"	1557	17.6

En el cuadro anterior se observa que los sitios de muestreos se encuentran distribuidos en los Estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz. Iniciando en el bordo de Santo Tomas, luego se continuó con el recorrido en los diferentes manantiales y embalses, hasta por ultimo hacer la toma de muestra en el rio de los reyes.

5.1.2 Concentración iónica de la zona.

Mientras que en el cuadro 15, se presentan las concentraciones iónicas de las diferentes aguas superficiales de esta la zona.

Cuadro 15. Concentración iónica del agua.

Sitio de muestreo	pH	C.E $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma Cationes	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma Aniones	% error	Σ ppm Σ mmolL ⁻¹	RSE mg L ⁻¹ RSC mg L ⁻¹
1	7.57	97.60	0.54	0.15	0.05	0.22	0.96	0.00	0.54	0.30	0.10	0.94	1.05		88.21
			10.82	1.82	1.15	8.60	0.00	32.94	10.64	4.80		70.78	83.00		
			0.27	0.08	0.05	0.22	0.00	0.54	0.30	0.05		1.51			
2	7.45	275.90	0.90	0.93	0.50	0.37	2.70	0.00	1.29	0.86	0.48	2.63	1.31		230.65
			18.04	11.31	11.50	14.47	0.00	1.29	0.86	23.05		187.54	222.00		
			0.45	0.47	0.50	0.37	0.00	1.29	0.86	0.24		4.18			
3	7.14	327.55	1.12	0.92	0.81	0.36	3.21	0.00	1.94	0.82	0.38	3.14	1.10		283.10
			22.44	11.19	18.63	14.08	0.00	118.36	29.07	18.25		232.02	228.00		
			0.56	0.46	0.81	0.36	0.00	1.94	0.82	0.19		5.14			
4	7.14	260.30	1.13	0.59	0.52	0.30	2.54	0.00	1.38	0.78	0.30	2.46	1.60		222.00
			22.65	7.17	11.96	11.73	0.00	84.19	27.65	14.41		179.76	152.00		
			0.57	0.30	0.52	0.30	0.00	1.38	0.78	0.15		3.99			
5	6.59	1230.00	4.28	4.50	2.85	0.40	12.03	0.00	8.89	2.66	0.15	11.70	1.39		872.30
			85.77	54.72	65.55	15.64	0.00	542.29	94.30	7.20		865.47	500.00		
			2.14	2.25	2.85	0.40	0.00	8.89	2.66	0.08		19.27			
6	7.17	294.35	0.73	1.15	0.85	0.15	2.88	0.00	1.88	0.75	0.17	2.80	1.41		240.60
			14.63	13.98	19.55	5.87	0.00	114.68	26.59	8.17		203.46	182.00		
			0.37	0.58	0.85	0.15	0.00	1.88	0.75	0.09		4.66			
7	6.84	331.55	0.97	1.31	0.70	0.27	3.25	0.00	2.04	0.81	0.30	3.15	1.56		232.20
			19.44	15.93	16.10	10.56	0.00	124.44	28.71	14.41		229.59	126.00		
			0.49	0.66	0.70	0.27	0.00	2.04	0.81	0.15		5.11			
8	7.53	186.95	0.57	0.87	0.28	0.11	1.83	0.00	1.35	0.25	0.19	1.79	1.10		158.70
			11.42	10.58	6.44	4.30	0.00	82.35	8.86	9.13		133.08	86.00		
			0.29	0.44	0.28	0.11	0.00	1.35	0.25	0.10		2.81			

Cuadro 15.....

Sitio de muestreo	pH	C.E. $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma Cationes	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma Aniones	% error	Σ ppm Σ mmolL ⁻¹	RSE mg L ⁻¹ RSC mg L ⁻¹	
9	7.04	182.30	0.76	0.47	0.45	0.10	1.78	0.00	1.23	0.31	0.19	1.73	1.42		157.00	
			15.23	5.72	10.35	3.91		0.00	75.03	10.99	9.13				130.35	118.00
			0.38	0.24	0.45	0.10		0.00	1.23	0.31	0.10				2.80	
10	6.98	239.40	0.65	1.23	0.30	0.14	2.32	0.00	1.72	0.42	0.13	2.27	1.09		208.90	
			13.03	14.96	6.90	5.47		0.00	104.92	14.89	6.24				166.41	106.00
			0.33	0.62	0.30	0.14		0.00	1.72	0.42	0.07				3.59	
11	7.24	168.00	0.64	0.78	0.12	0.10	1.64	0.00	0.81	0.66	0.13	1.60	1.23		130.40	
			12.83	9.48	2.76	3.91		0.00	49.41	23.40	6.24				108.03	96.00
			0.32	0.39	0.12	0.10		0.00	0.81	0.66	0.07				2.47	
12	7.02	899.50	2.59	2.38	3.40	0.43	8.80	0.00	5.71	2.02	0.83	8.56	1.38		641.20	
			51.90	28.94	78.20	16.81		0.00	348.31	71.61	39.86				635.64	466.00
			1.30	1.19	3.40	0.43		0.00	5.71	2.02	0.42				14.46	
13	7.21	790.50	2.57	1.60	2.60	0.36	7.13	0.00	3.70	2.58	1.06	7.34	1.45		516.40	
			51.50	19.46	59.80	14.08		0.00	225.70	91.46	50.91				512.91	406.00
			1.29	0.80	2.60	0.36		0.00	3.70	2.58	0.53				11.86	
14	7.51	580.50	1.58	2.77	1.15	0.18	5.68	0.00	4.32	1.10	0.10	5.52	1.43		414.10	
			31.66	33.68	26.45	7.04		0.00	263.52	39.00	4.80				406.15	276.00
			0.79	1.39	1.15	0.18		0.00	4.32	1.10	0.05				8.98	
15	7.06	726.00	2.34	1.60	2.60	0.36	6.90	0.00	3.93	1.87	1.30	7.10	1.43		512.00	
			46.89	19.46	59.80	14.08		0.00	239.73	66.29	62.44				508.69	368.00
			1.17	0.80	2.60	0.36		0.00	3.93	1.87	0.65				11.38	
16	7.11	413.50	1.51	1.56	0.75	0.23	4.05	0.00	2.16	1.54	0.24	3.94	1.38		278.50	
			30.26	18.97	17.25	8.99		0.00	131.76	54.59	11.53				273.35	166.00
			0.76	0.78	0.75	0.23		0.00	2.16	1.54	0.12				6.34	
17	7.27	292.55	1.38	1.12	0.25	0.12	2.87	0.00	1.95	0.58	0.26	2.79	1.41		234.64	
			27.66	13.62	5.75	4.69		0.00	118.95	20.56	12.49				203.72	202.00
			0.69	0.56	0.25	0.12		0.00	1.95	0.58	0.13				4.28	
18	7.11	538.00	2.25	2.18	0.65	0.18	5.26	0.00	3.88	0.73	0.51	5.12	1.35		351.10	
			45.09	26.51	14.95	7.04		0.00	236.68	25.88	24.50				380.64	284.00
			1.13	1.09	0.65	0.18		0.00	3.88	0.73	0.26				7.91	
19	6.90	1727.50	8.48	4.43	4.00	0.14	17.05	0.00	5.05	3.67	7.73	16.45	1.79		1272.00	
			169.94	53.87	92.00	5.47		0.00	308.05	130.10	371.27				1130.71	1178.00
			4.25	2.22	4.00	0.14		0.00	5.05	3.67	3.87				23.19	

Cuadro 15.....

Sitio de muestreo	p H	C.E $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma Cationes	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma Aniones	% error	Σ ppm Σ mmolL ⁻¹	RSE mg L ⁻¹
			mmol. L ⁻¹					mmol. L ⁻¹							RSC mg L ⁻¹
20	7.37	1795.50	7.54	5.95	3.95	0.12	17.56	0.00	5.08	3.66	8.36	17.10	1.33		1171.00
			151.10	72.35	90.85	4.69		0.00	309.88	129.75	401.53			1160.15	1002.00
			3.78	2.98	3.95	0.12		0.00	5.08	3.66	4.18			23.74	
21	6.76	1681.00	7.60	4.95	3.75	0.14	16.44	0.00	6.36	3.82	5.83	16.01	1.33		1204.50
			152.30	60.19	86.25	5.47		0.00	387.96	135.42	280.01			1107.61	1004.00
			3.81	2.48	3.75	0.14		0.00	6.36	3.82	2.92			23.27	
22	7.28	456.00	1.84	1.67	0.86	0.09	4.46	0.00	2.52	0.82	0.99	4.33	1.48		318.00
			36.87	20.31	19.78	3.52		0.00	153.72	29.07	47.55			310.82	190.00
			0.92	0.84	0.86	0.09		0.00	2.52	0.82	0.50			6.54	
23	7.39	606.50	2.48	1.42	1.95	0.09	5.94	0.00	2.74	1.66	1.38	5.78	1.37		416.30
			49.70	17.27	44.85	3.52		0.00	167.14	58.85	66.28			407.60	242.00
			1.24	0.71	1.95	0.09		0.00	2.74	1.66	0.69			9.08	
24	7.50	516.00	1.66	1.18	1.96	0.25	5.05	0.00	2.93	1.88	0.11	4.92	1.30		359.30
			33.27	14.35	45.08	9.78		0.00	178.73	66.65	5.28			353.13	218.00
			0.83	0.59	1.96	0.25		0.00	2.93	1.88	0.06			8.50	
25	7.47	725.50	2.40	2.32	2.15	0.23	7.10	0.00	4.19	1.81	0.90	6.90	1.43		552.00
			48.10	28.21	49.45	8.99		0.00	255.59	64.16	43.23			497.73	510.00
			1.20	1.16	2.15	0.23		0.00	4.19	1.81	0.45			11.19	
26	7.73	940.50	2.35	3.48	3.15	0.22	9.20	0.00	5.85	2.26	0.89	9.00	1.10		656.00
			47.09	42.32	72.45	8.60		0.00	356.85	80.12	42.75			650.18	480.00
			1.18	1.74	3.15	0.22		0.00	5.85	2.26	0.45			14.84	
27	7.66	787.00	2.61	1.96	2.95	0.18	7.70	0.00	4.31	2.68	0.51	7.50	1.32		537.80
			52.30	23.83	67.85	7.04		0.00	262.91	95.01	24.50			533.44	330.00
			1.31	0.98	2.95	0.18		0.00	4.31	2.68	0.26			12.66	
28	7.45	277.20	0.70	0.80	0.90	0.31	2.71	0.00	1.65	0.72	0.26	2.63	1.50		196.00
			14.03	9.73	20.70	12.12		0.00	100.65	25.52	12.49			195.24	124.00
			0.35	0.40	0.90	0.31		0.00	1.65	0.72	0.13			4.46	
29	7.28	315.60	1.08	1.24	0.51	0.26	3.09	0.00	1.96	0.86	0.18	3.00	1.48		226.20
			21.64	15.08	11.73	10.17		0.00	119.56	30.49	8.65			217.31	168.20
			0.54	0.62	0.51	0.26		0.00	1.96	0.86	0.09			4.84	
30	6.97	624.50	2.85	1.26	1.76	0.24	6.11	0.00	2.94	2.63	0.37	5.94	1.41		428.20
			57.11	15.32	40.48	9.38		0.00	179.34	93.23	17.77			412.64	321.00
			1.43	0.63	1.76	0.24		0.00	2.94	2.63	0.19			9.81	

Cuadro 15.....

Sitio de muestreo	p H	C.E $\mu\text{S cm}^{-1}$	Cationes				Suma Cationes	Aniones				Suma Aniones	% error	Σ ppm Σ mmolL ⁻¹	RSE mg L ⁻¹ RSC mg L ⁻¹	
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺		CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻					
31	7.42	298.30	0.70	0.95	0.98	0.28	2.91	0.00	1.78	0.75	0.30	2.83	1.39		214.20	
			14.03	11.55	22.54	10.95		0.00	108.58	26.59	14.41				208.64	165.10
			0.35	0.48	0.98	0.28		0.00	1.78	0.75	0.15				4.77	
32	7.52	245.25	1.42	0.47	0.43	0.08	2.40	0.00	1.65	0.46	0.22	2.33	1.48		182.40	
			28.46	5.72	9.89	3.13		0.00	100.65	16.31	10.57				174.71	136.50
			0.71	0.24	0.43	0.08		0.00	1.65	0.46	0.11				3.68	
33	7.94	106.85	0.35	0.25	0.37	0.08	1.05	0.00	0.60	0.22	0.20	1.02	1.45		81.20	
			7.01	3.04	8.51	3.13		0.00	36.60	7.80	9.61				75.70	69.20
			0.18	0.13	0.37	0.08		0.00	0.60	0.22	0.10				1.67	
34	7.84	150.00	0.75	0.30	0.32	0.10	1.47	0.00	0.85	0.46	0.12	1.43	1.38		116.00	
			15.03	3.65	7.36	3.91		0.00	51.85	16.31	5.76				103.87	60.00
			0.38	0.15	0.32	0.10		0.00	0.85	0.46	0.06				2.32	
35	6.70	56.70	0.12	0.14	0.25	0.05	0.56	0.00	0.32	0.20	0.02	0.54	1.82		49.00	
			2.40	1.70	5.75	1.96		0.00	19.52	7.09	0.96				39.39	45.00
			0.06	0.07	0.25	0.05		0.00	0.32	0.20	0.01				0.96	

5.1.3 Relaciones iónicas de las aguas superficiales

La composición iónica de las aguas muestreadas en este apartado predominaron los iones bicarbonato por el lado de los aniones y por el lado de los cationes fue el calcio principalmente.

Estas aguas contienen en solución diferentes especies de iones, por lo tanto tienen diferentes relaciones tanto de cationes como aniones. Así en condiciones de equilibrio con los suelos debido a su diferente quimismo, desarrollan distintos procesos físico-químicos en los suelos. De tal manera que en este trabajo de investigación se analizaron las aguas superficiales de acuerdo con las diferentes relaciones aniónicas (tipos de agua). Estos tipos de agua van a desarrollar distintos tipos de salinización en los suelos.

Los tipos de agua que desarrollan diferentes tipos de salinización son:

1- Clorhídricas	Cl / SO ₄	> 2.0
2- Sulfático-clorhídrica	Cl / SO ₄	= 1.0 - 2.0
3- Clorhídrico-sulfáticas	Cl / SO ₄	= 0.2 - 1.0
4- Sulfáticas	Cl / SO ₄	< 0.2
5- Sulfáticas-sódicas	HCO ₃ / Cl + SO ₄	= 2.0

Con base en que las rocas volcánicas están constituidas principalmente por minerales silicatados, los cuales en la mayoría de los casos son insolubles; se puede decir que las aguas que recorren y se almacenan en esta zona de estudio, son de concentraciones iónicas bajas. Can (2005), encontró coincidencias en la zona de los valles del río Tulancingo, estado de Hidalgo, concentraciones iónicas bajas y con predominio de bicarbonatos por la parte de los aniones y calcio seguido del magnesio fueron los cationes predominantes.

El número de muestras de agua con diferentes tipos de quimismo que se encuentran en la porción de las aguas estudiadas, fueron como sigue: 1). composición clorhídrica 22 muestras; 2). composición sulfático-clorhídrica 7 muestras; 3). composición clorhídrica sulfática 4 muestras. 4) y Sulfáticas-sódicas 2 muestras.

5.1.4 Distribución de cationes y aniones en las aguas

La distribución y concentración de los diferentes iones (cationes y aniones) de las muestras de agua recolectadas se presenta en la Figura 8, lo cual nos permite observar con mejor claridad la predominancia de los iones en las muestras de agua en cada sitio de muestreo a lo largo del recorrido.

En la figura 8, el área bajo la curva muestra la concentración de cada ion con las muestras sin sobrepasar los $20 \text{ mmol}_e\text{L}^{-1}$. Siendo el Sodio (Na^+) de baja concentración menor a $2 \text{ mmol}_e\text{L}^{-1}$ ya que en la mayoría de estas aguas son para el riego agrícola. Algunas de las muestras que presentaron un contenido de sodio mayor al indicado fueron la muestra 12 presentó $3.40 \text{ mmol}_e\text{L}^{-1}$, la muestra 13 presentó $2.60 \text{ mmol}_e\text{L}^{-1}$, mientras que la muestra 19 presentó $4.0 \text{ mmol}_e\text{L}^{-1}$.

Además los cationes de mayor predominancia son el Ca (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), por el origen de las rocas volcánicas.

Mientras que los aniones el predominante es el bicarbonato (HCO_3^-). En el caso de algunas muestras el contenido de sulfato (SO_4) es mayor que el bicarbonato, caso la muestra 19 es de $7.73 \text{ mmol}_e\text{L}^{-1}$, y la muestra 20 con $8.36 \text{ mmol}_e\text{L}^{-1}$.

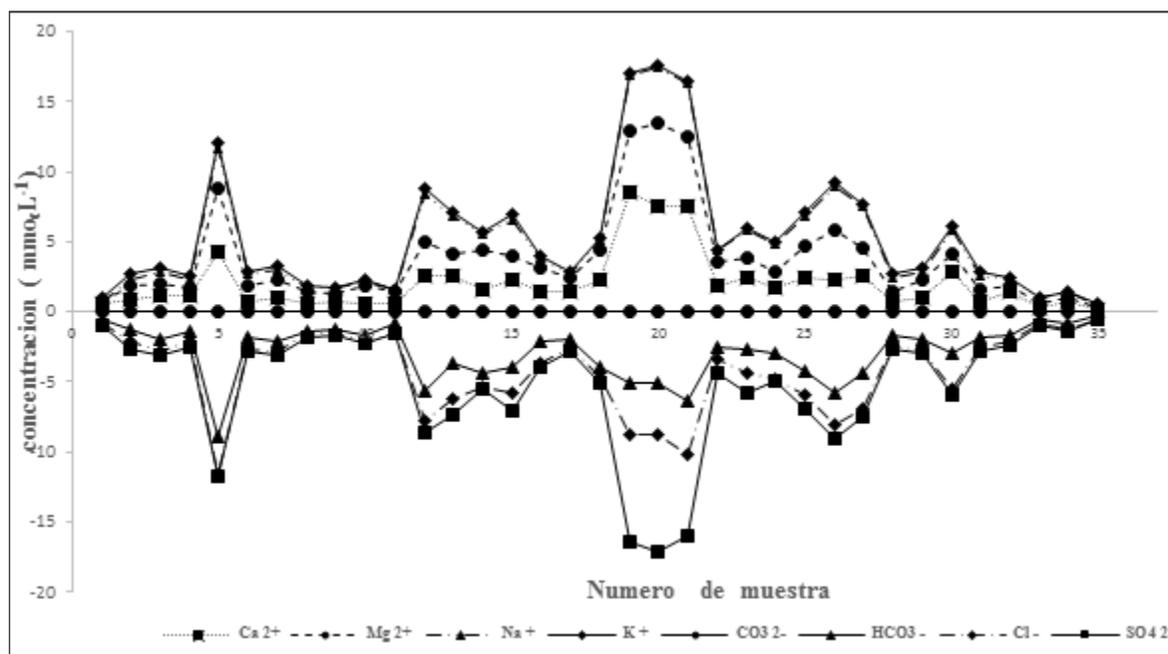


Figura 8. Distribución de iones ($\text{mmol}_e\text{L}^{-1}$) de las aguas superficiales.

Clasificación de las aguas con base en su salinidad

5.1.5 Relación entre la conductividad eléctrica determinada teóricamente y la conductividad eléctrica determinada experimentalmente

Dadas las concentraciones de las soluciones naturales de aguas que fluyen en los diferentes sitios; ríos, aguas de los suelos, aguas freáticas, manantiales y aguas subterráneas, se recomienda medir la conductividad eléctrica de la solución expresada en $\mu\text{S cm}^{-1}$.

Para entender la concentración de las sales solubles en las soluciones acuosas, se puede hacer por medio de mediciones de la conductividad eléctrica de las soluciones, se tienen dos relaciones funcionales: $\text{mmol}_c \text{L}^{-1} = f_a \text{CE}$ y $\text{mg L}^{-1} = f_a \text{CE}$. Es necesario señalar que, cuando se determina la concentración de sales expresada en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, la conductividad eléctrica depende del número de iones en solución, en cambio cuando se hace necesario determinar los miligramos por litro (mg L^{-1}) o partes por millón (ppm), la conductividad eléctrica depende del número de partículas en la solución y además del peso de las partículas.

Se procedió a establecer la relación funcional: $\text{CE}_{\text{teórica}} = f_a \text{CE}_{\text{experimental}}$ con la propósito de establecer en qué medida, los valores experimentales de la conductividad eléctrica, se encuentran en correspondencia con los valores teóricos de la conductividad eléctrica de las aguas.

Para determinar la conductividad eléctrica teórica en cada muestra de agua, se hizo de la siguiente manera: cada ión ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$) fue multiplicado por su factor de conductividad eléctrica y su correspondiente suma es el valor de la conductividad eléctrica teórica. En el Cuadro 16, se presentan los valores teóricos de conductividad eléctrica de cada ión.

Cuadro 16. Valores teóricos de la conductividad eléctrica de los iones que comúnmente se encuentran en las aguas naturales.

Ion	Conductividad eléctrica a 25 °C ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	
	Por mmol L^{-1}	Por mg L^{-1}
Bicarbonato	43.6	0.715
Calcio	52.0	2.60
Carbonato	84.6	2.82
Cloruro	75.9	2.14
Magnesio	46.6	3.82
Nitrato	71.0	1.15
Potasio	72.0	1.84
sodio	48.9	2.13
sulfato	73.9	1.54

(APHA, 1995).

La relación de la CE teórica y experimental fue de 0.94 para estos datos, como se presenta en la figura 9. El intervalo de aceptación establecido por este método de comprobación de datos analíticos es de $0.9 < CE_{\text{teórica}}/CE_{\text{experimental}} < 1.1$, lo que nos indica que los datos analíticos obtenidos en ese trabajo son correctos.

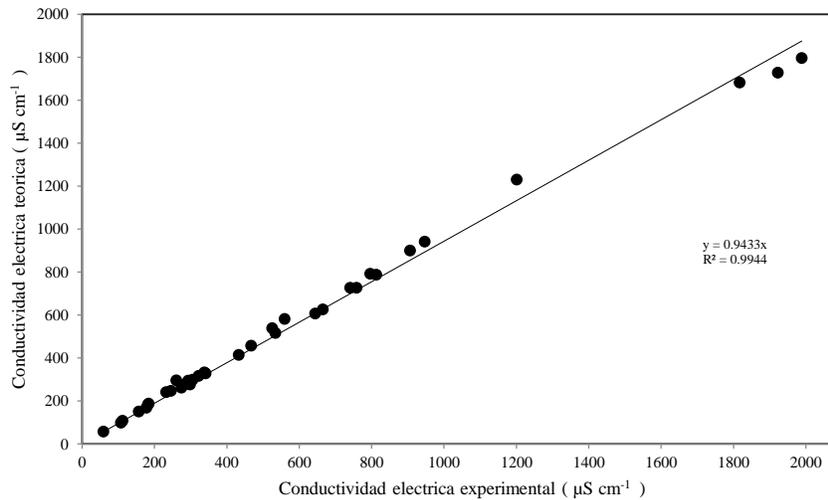


Figura 9. Relación conjunta entre la conductividad eléctrica teórica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y la experimental ($\mu\text{S cm}^{-1}$), de las aguas superficiales.

Es importante señalar que las sales solubles que se encuentran disociados en las aguas superficiales y subterráneas están formando iones independientes diferentes. Los fenómenos de disociación ocurren de acuerdo con las leyes de disociación electrolítica. Es así que los valores de

conductividad eléctrica de diferentes soluciones salinas es proporcional a las concentraciones iónicas de estas mismas soluciones.

5.1.6 Relación de mg L^{-1} (STD) analíticos con respecto a la CE expresada en $\mu\text{S cm}^{-1}$

Como lo han señalado diferentes autores (Richards, 1973; Jurinak y Suarez, 1990; Velázquez, 2001; Ramírez, 1988), en investigaciones específicas sobre numerosas determinaciones de la conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$) y su relación con la cantidad en peso de los distintos iones disociados, se ha establecido que las mediciones de la conductividad eléctrica son directamente proporcionales a los pesos de las sales disociadas. También se ha hecho señalado que esta relación funcional $\text{mg L}^{-1} = f a \text{ CE}$, en su proporcionalidad depende de la pendiente, cuyos valores que adquiere dependen del tipo de salinidad. Para diferentes tipos de sales puras y tipos de salinidad, los valores de la pendiente varían de 0.580-1.250 cuando la conductividad eléctrica está expresada en $\mu\text{S cm}^{-1}$.

En la Figura 10, se presenta la relación funcional entre las concentraciones de las sales solubles de las aguas naturales y su valor correspondiente de la conductividad eléctrica: $\text{mg L}^{-1} = f a \text{ CE}$. El valor de la pendiente (a) encontrada es de 0.6707, que corresponde a aguas con una concentración considerable de iones bicarbonato.

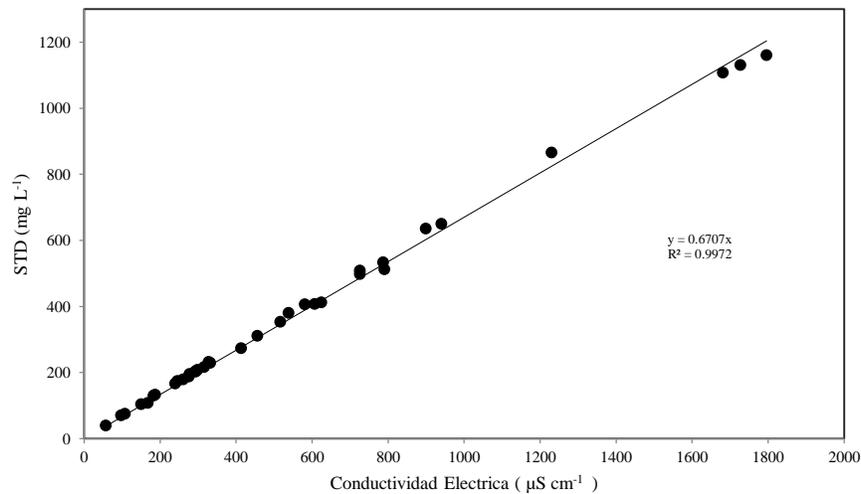


Figura 10. Relación conjunta entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y los STD (mg L^{-1}), de las aguas superficiales.

5.1.7 Relación de la suma de cationes y de aniones ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$) con la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de las aguas en Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

En cuanto a las propiedades de las soluciones salinas, aguas naturales superficiales y subterráneas, y de los suelos, las mediciones de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de las diferentes soluciones acuosas está en función directamente proporcional a la concentración de cationes o de aniones ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$). Cabe destacar nuevamente que la electroneutralidad siempre se debe observar. Conocer los valores de la relación funcional de cationes o de aniones $\text{mmol}_c \text{L}^{-1} = f_a \text{CE}$, es muy importante, ya que en las determinaciones analíticas de las sumas de cationes o de aniones, éstas deben ser aproximadamente iguales, tomando en cuenta los porcentajes correspondientes permisibles de error (Richards, 1973; Eaton et al., 1995).

Se presentan los valores de la relación funcional $\text{mmol}_c \text{L}^{-1} = f_a \text{CE}$, para cationes y aniones de las aguas naturales. En la Figura 11, el valor de la pendiente para cationes es de 0.0098 y en la Figura 12, su valor de aniones es de 0.0095 para las diferentes aguas.

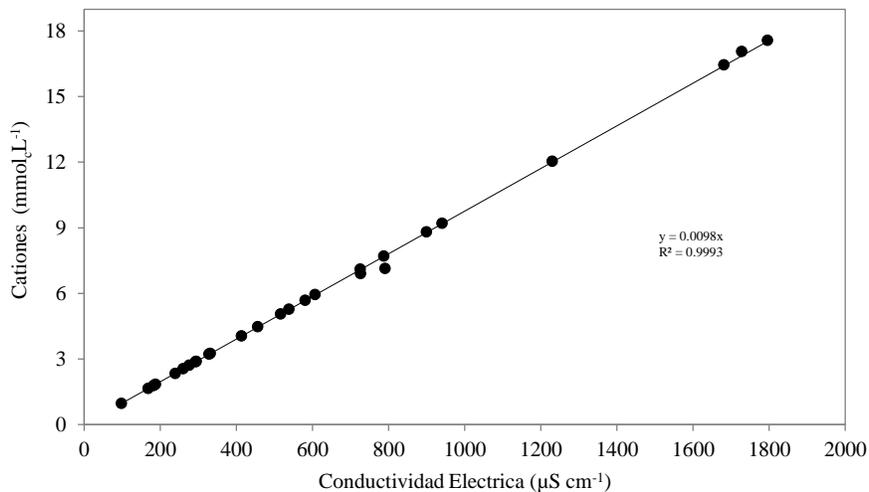


Figura 11. Relación conjunta entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y cationes ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$), de las aguas superficiales.

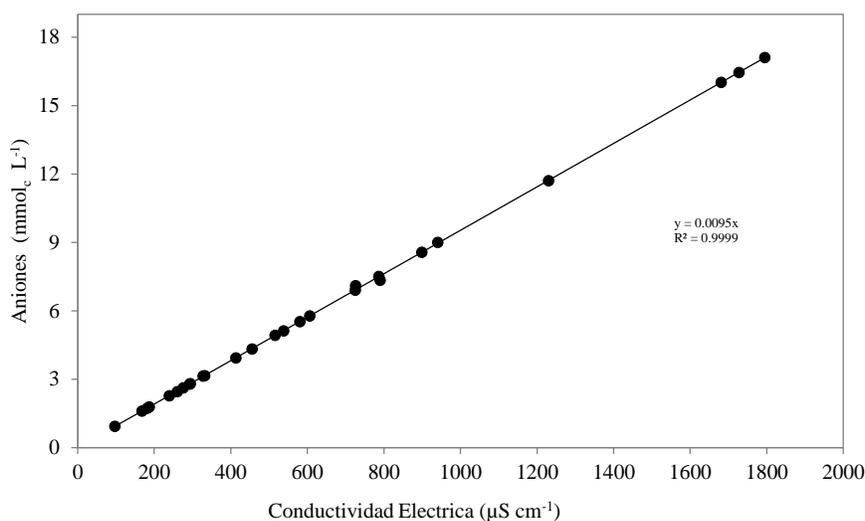


Figura 12. Relación conjunta entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y aniones (mmolc L^{-1}), de las aguas superficiales.

5.1.8 Índice de salinidad efectiva

La salinidad efectiva es una forma más puntual del peligro que representan las sales solubles del agua de riego, pues cuando son aplicadas forman parte de la solución del suelo (Donnen, 1975), tomando en cuenta la precipitación de las sales menos solubles, como el carbonato de calcio y el carbonato de magnesio, así como el sulfato de calcio. Este proceso es más notable cuando las aguas tienen un alto contenido de carbonatos y bicarbonatos, como las aguas que se muestrearon en el presente trabajo.

Este índice toma en cuenta los carbonatos de calcio y magnesio y sulfatos de calcio, que precipitan fácilmente cuando el agua de riego pasa a formar parte de la solución del suelo, los cuales dejan de participar en la elevación de la presión osmótica, así se conocen mejor los peligros de las sales que se encuentran en solución.

En el cuadro 17, muestra los resultados del muestro respecto a este índice (SE). Dentro de la clasificación de buena calidad para el uso en el riego se encuentra el 74.3 % de los sitios los cuales no representan peligro para su uso; y el 25.7% está dentro del tipo de agua condicionada, las cuales pueden mezclarse con las sales del suelo ocasionando severos problemas a los cultivos y a los suelos. Mientras que la clasificación no recomendable no se tiene.

Cuadro 17. Clasificación de las aguas, de acuerdo con su salinidad efectiva.

Numero de muestra	índice de Salinidad Efectiva	Clasificación	Numero de muestra	índice de Salinidad Efectiva	Clasificación
1	0.42	buena	19	8.57	condicionada
2	1.41	buena	20	10.02	condicionada
3	1.17	buena	21	8.84	condicionada
4	1.16	buena	22	1.94	buena
5	3.25	condicionada	23	3.20	condicionada
6	1.00	buena	24	2.21	buena
7	1.21	buena	25	2.91	buena
8	0.48	buena	26	3.37	condicionada
9	0.55	buena	27	3.39	condicionada
10	0.60	buena	28	1.21	buena
11	0.83	buena	29	0.95	buena
12	3.83	condicionada	30	2.00	buena
13	3.43	condicionada	31	1.26	buena
14	1.36	buena	32	0.75	buena
15	2.97	buena	33	0.70	buena
16	1.89	buena	34	0.62	buena
17	0.92	buena	35	0.30	buena
18	1.38	buena			

5.1.9 Relación de Índice de salinidad potencial

La salinidad potencial determina la cantidad de Cl^- y SO_4^{2-} que pueden afectar los cultivos, pues son las últimas sales que permanecen en la solución del suelo cuando la humedad aprovechable disminuye a menos del 50%, es por eso que se debe estimar su efecto sobre la presión osmótica (Ramírez, 2009).

Los resultados de este índice, se muestran en el Cuadro 18, lo cual indica que el 88.6% están clasificadas como aguas buenas para riego, el 11.4% son aguas condicionadas. Mientras que la clasificación no recomendable no se tiene.

En general las aguas muestreadas no representan peligro para su uso, ya que el contenido de cloruros y sulfatos no son altos.

Cuadro 18. Clasificación de las aguas, de acuerdo con su salinidad efectiva.

Numero de muestra	índice de salinidad potencial	Clasificación	Numero de muestra	índice de salinidad potencial	Clasificación
1	0.35	buena	19	7.54	condicionada
2	1.10	buena	20	7.84	condicionada
3	1.01	buena	21	6.74	condicionada
4	0.93	buena	22	1.32	buena
5	2.74	buena	23	2.35	buena
6	0.84	buena	24	1.94	buena
7	0.96	buena	25	2.26	buena
8	0.35	buena	26	2.71	buena
9	0.41	buena	27	2.94	buena
10	0.49	buena	28	0.85	buena
11	0.73	buena	29	0.95	buena
12	2.44	buena	30	2.82	buena
13	3.11	condicionada	31	0.90	buena
14	1.15	buena	32	0.57	buena
15	2.52	buena	33	0.32	buena
16	1.66	buena	34	0.52	buena
17	0.71	buena	35	0.21	buena
18	0.99	buena			

5.1.10 Síntesis de clasificación de las aguas con base en su relación de adsorción de sodio (RAS)

En el cuadro 19, al comparar las aguas y clasificarlas de acuerdo con los diferentes RAS, se aprecia que la mayoría de éstas quedaron agrupadas en la clasificación C2S1 con un 48.6 %, C1S1 con un 28.6 %, y la clasificación C3S1 con un 22.9 %; lo que muestra que la mayoría de las aguas analizadas son bajas en sodio.

Es importante mencionar, que los niveles de sodificación que adquieren los diferentes suelos que son regados con aguas de distintas relaciones catiónicas dependerán de los valores de los distintos RAS. Otro aspecto importante a resaltar, es que la tendencia en cuanto a la clasificación de las aguas con los diferentes RAS fue similar.

Lo preliminar tiene su explicación en las composiciones catiónicas, debido a que las aguas presentan concentraciones importantes de calcio y magnesio comparadas con las de sodio, lo que no modifica el

valor de la relación de adsorción de sodio en sus diferentes formulaciones, aunque cabe decir, que en general fue mayor el RAS_{aj} que el RAS^o y los valores de este último superaron a los del RAS original.

Cuadro 19. Valores de las distintas formulaciones de RAS, de las aguas superficiales.

Numero de muestra	CE (µS cm ⁻¹)	RAS original	clasificación	RAS ajustado	clasificación	RAS corregido	clasificación
1	0.098	0.09	C1-S1	0.10	C1-S1	0.05	C1-S1
2	0.276	0.52	C2-S1	0.64	C2-S1	0.46	C2-S1
3	0.328	0.80	C2-S1	1.22	C2-S1	0.77	C2-S1
4	0.260	0.56	C2-S1	0.69	C2-S1	0.49	C2-S1
5	1.230	1.36	C3-S1	3.69	C3-S1	1.67	C3-S1
6	0.294	0.88	C1-S1	1.16	C1-S1	0.82	C1-S1
7	0.332	0.66	C2-S1	1.00	C2-S1	0.63	C2-S1
8	0.187	0.33	C1-S1	0.31	C1-S1	0.28	C1-S1
9	0.182	0.57	C1-S1	0.54	C1-S1	0.46	C1-S1
10	0.239	0.31	C1-S1	0.48	C1-S1	0.28	C1-S1
11	0.168	0.14	C1-S1	0.12	C1-S1	0.11	C1-S1
12	0.900	2.16	C3-S1	4.99	C3-S1	2.54	C3-S1
13	0.791	1.80	C3-S1	3.71	C3-S1	2.08	C3-S1
14	0.581	0.78	C2-S1	1.69	C2-S1	0.83	C2-S1
15	0.726	1.85	C2-S1	3.82	C2-S1	2.13	C2-S1
16	0.414	0.61	C2-S1	1.02	C2-S1	0.61	C2-S1
17	0.293	0.22	C2-S1	0.38	C2-S1	0.22	C2-S1
18	0.538	0.44	C2-S1	0.91	C2-S1	0.49	C2-S1
19	1.728	1.57	C3-S1	4.07	C3-S1	2.02	C3-S1
20	1.796	1.52	C3-S1	3.97	C3-S1	1.90	C3-S1
21	1.681	1.50	C3-S1	3.98	C3-S1	1.93	C3-S1
22	0.456	0.65	C2-S1	1.09	C2-S1	0.66	C2-S1
23	0.607	1.40	C2-S1	2.72	C2-S1	1.49	C2-S1
24	0.516	1.64	C2-S1	3.03	C2-S1	1.74	C2-S1
25	0.726	1.40	C2-S1	3.02	C2-S1	1.58	C2-S1
26	0.941	1.84	C3-S1	4.41	C3-S1	2.08	C3-S1
27	0.787	1.95	C3-S1	4.19	C3-S1	2.28	C3-S1
28	0.277	1.04	C2-S1	1.22	C2-S1	0.93	C2-S1
29	0.316	0.47	C2-S1	0.81	C2-S1	0.45	C2-S1
30	0.625	1.23	C2-S1	2.30	C2-S1	1.38	C2-S1
31	0.298	1.08	C2-S1	1.31	C2-S1	0.99	C2-S1
32	0.245	0.44	C1-S1	0.59	C1-S1	0.41	C1-S1
33	0.107	0.68	C1-S1	0.34	C1-S1	0.43	C1-S1
34	0.150	0.44	C1-S1	0.38	C1-S1	0.33	C1-S1
35	0.057	0.69	C1-S1	0.48	C1-S1	0.34	C1-S1

5.1.11 Clasificación de las aguas en cuanto al peligro de la disminución de la infiltración

En cuanto a la reducción en la tasa de infiltración de las aguas de riego puede, por lo general, ser atribuida a la formación de costras en la superficie de los suelos, a la depositación y migración de arcillas dentro de los poros y microporos de los suelos, y al hinchamiento de las arcillas 2:1, del grupo de la montmorillonita.

Cuando las aguas de riego tienen altos valores de la relación de adsorción de sodio (RAS), y riegan suelos que contienen minerales arcillosos 2:1, en estos suelos se presentan los valores más altos de disminución de la conductividad hidráulica (McNeal y Coleman, 1966). Una tasa de infiltración se considera baja si es de 3.0 mm h^{-1} , mientras que una infiltración de 12.0 mm h^{-1} es considerada relativamente alta.

En las Figuras 13, se presenta las relaciones RAS-CE de las diferentes aguas de los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

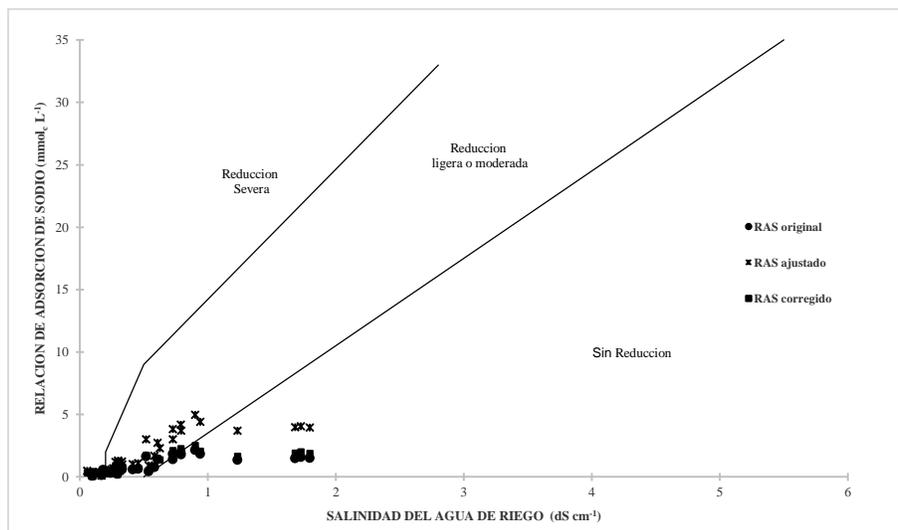


Figura 13. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio (RAS_{or} , RAS_{aj} y RAS^o) de las aguas superficiales.

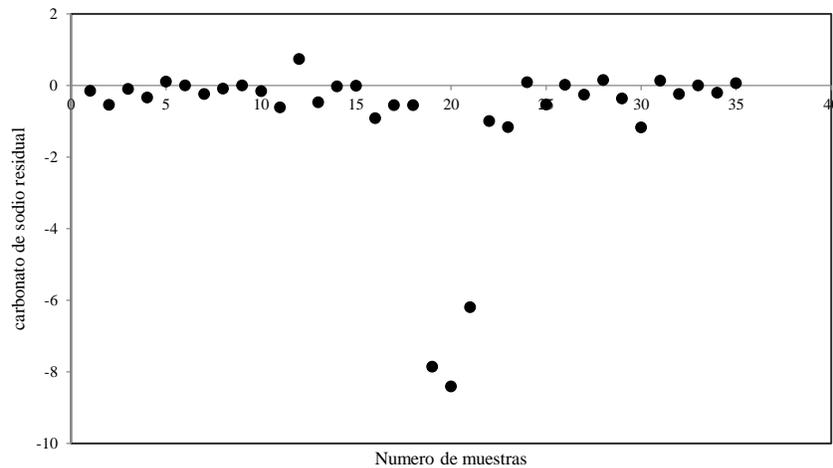
5.1.12 Carbonato de Sodio Residual en las aguas de los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz

Cuando en el agua de riego el contenido de carbonatos y bicarbonatos es mayor que el calcio y magnesio, existe la posibilidad de que se forme carbonato de sodio (Na_2CO_3), debido a que, por su alta solubilidad, puede permanecer en solución aún después de que han precipitado los carbonatos de calcio y magnesio. En estas condiciones el sodio puede ser suficiente para desplazar el calcio y al magnesio del complejo de intercambio, produciéndose con esto la defloculación del suelo (Wilcox *et al.*, 1954).

El carbonato de sodio residual (CSR) se calcula de acuerdo con la siguiente formula:

$$CSR = (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

En la Figura 14, se presenta la clasificación de las aguas de acuerdo al índice de carbonato de sodio residual (CSR), para el muestreo realizado.



CSR > 2.5 mmolc L⁻¹ = No recomendable; CSR = 1.25-2.5 = Condicionada y CSR < 1.25 = Buena.

Figura 14. Distribución de las aguas superficiales, de acuerdo con el contenido de carbonato de sodio residual (mmolc L⁻¹) muestreadas en Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

5.1.13 IONES ESPECIFICOS

Contenido de nitrógeno en las aguas

El agua de riego puede contener niveles excesivos de nitrógeno, perjudicando ciertos cultivos que son sensibles, manifestándose por un mayor crecimiento vegetativo que provocará un retraso en la maduración y baja calidad del producto (Ayers y Wescot, 1987)

Cuando las aguas de riego tienen una concentración $< 5 \text{ mg L}^{-1}$, no se presenta ninguna restricción en su uso, si la concentración de nitratos fluctúa dentro del rango de 5 a 30 mg L^{-1} , el uso de esta agua presenta una restricción moderada. En cambio si las aguas de riego tienen una concentración de nitratos $> 30 \text{ mg L}^{-1}$, estas aguas presentan restricciones severas en su uso.

En la Figura 15, se presentan los contenidos de los nitratos en las muestras de agua de las corrientes superficiales de los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz. El agua de riego puede contener niveles excesivos de nitrógeno, perjudicando ciertos.

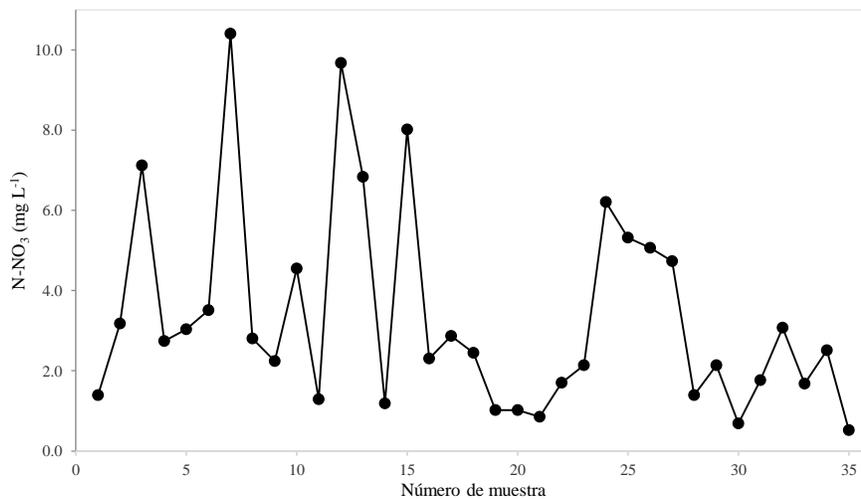


Figura 15. Concentración de Nitratos (mg L^{-1}) de las aguas superficiales de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Contenido de fósforo en las aguas

En la agricultura de riego los cultivos son comúnmente fertilizadas con la finalidad de obtener los máximos rendimientos. Sin embargo, las aplicaciones de fertilizantes son algunas veces reducidas o se omiten debido a los costos de los fertilizantes. Se ha encontrado que el nitrógeno (N) y el fósforo (P) aumentan la tolerancia de los cultivos a la salinidad.

Los fertilizantes fosforados se aplican a los suelos en forma de ortofosfatos (PO_4^{3-}). La absorción del fósforo (P) por las plantas a través de sus raíces se hace en forma de (H_2PO^-). El contenido de fósforo en las aguas se presenta en la Figura 16.

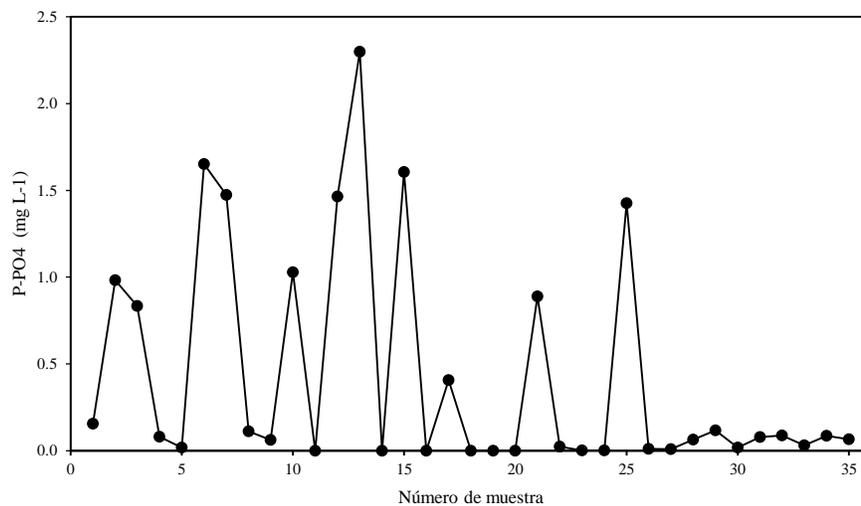


Figura 16. Concentración de Fósforo (mg L^{-1}) de las aguas superficiales de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Contenido de Boro en las aguas

El boro es un elemento esencial para el desarrollo y crecimiento de los cultivos agrícolas, pero se hace tóxico para algunos cultivos cuando sus concentraciones en la solución del suelo exceden las cantidades que los cultivos requieren para su óptimo desarrollo y crecimiento.

Se han establecido nuevos límites de tolerancia al boro para una gran variedad de cultivos, de tal manera que se han propuesto diferentes intervalos de toxicidad, como por ejemplo: 1. Para cultivos muy sensibles ($<0.5 \text{ mg L}^{-1}$); 2. Para cultivos sensibles ($0.5-1.0 \text{ mg L}^{-1}$); 3. Para cultivos moderadamente sensibles ($2.0-4.0 \text{ mg L}^{-1}$); 4. Para cultivos tolerantes ($4.0-6.0 \text{ mg L}^{-1}$) y 5. Para cultivos muy tolerantes ($6.0-15.0 \text{ mg L}^{-1}$) de acuerdo con Ayers y Wescot, (1987).

En la Figura 17, se presentan las concentraciones de boro en las muestras de agua de los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

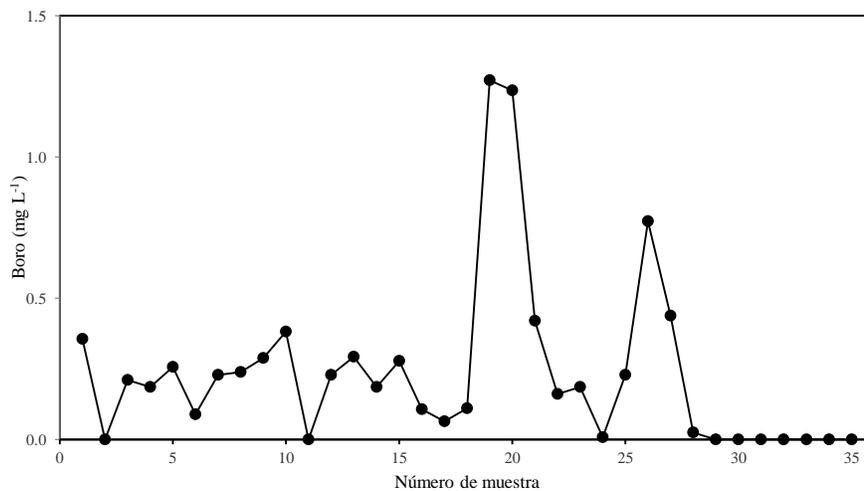


Figura 17. Concentración de Boro (mg L^{-1}) de las aguas superficiales de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Contenido de Silicio en las aguas

El silicio como segundo elemento más abundante del planeta, se encuentra presente en la generalidad de las aguas. Muchas de las aguas naturales presentan concentraciones $<10 \text{ mg L}^{-1}$, sin embargo, se pueden encontrar aguas con presencia del silicio en cantidades mayores a 80 mg L^{-1} , por ejemplo las aguas volcánicas, y aunque no presenta efectos tóxicos conocidos, el análisis del silicio en las aguas para riego ayuda a evitar la formación de depósitos duros de este elemento en el suelo agrícola.

Los minerales de silicio son insolubles en pH bajos, y la solubilidad de estos aumenta mínimamente en intervalos de $\text{pH} = 2.0 - 9.0$. Arriba de un $\text{pH} = 9.0$ los minerales del silicio se solubilizan considerablemente.

En la Figura 18, se presentan los contenidos de SiO_2 en las muestras de agua de las aguas superficiales de los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

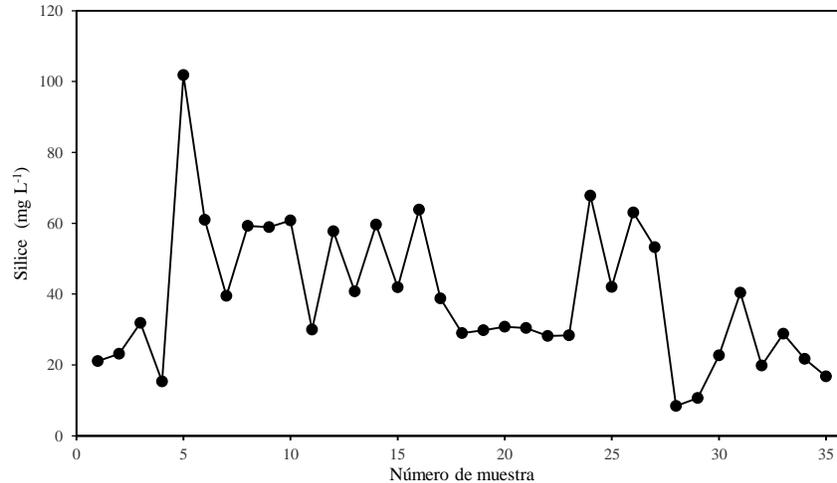


Figura 18. Concentración de Sílice (mg L^{-1}) de las aguas superficiales de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

5.2 SALINAS DE ZAPOTITLÁN SALINAS, PUEBLA

5.2.1 Localización geográfica de las salinas en el municipio Zapotitlán, Salinas Puebla

Los sitios que se muestran en el cuadro 20, contiene los datos tomados en campo como es las coordenadas geográficas, la altitud en metros y la temperatura en grados Celsius.

Cuadro 20. Localización de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.

No.	Sitio de muestreo	Coordenadas		Altitud	Temperatura
		N	W	msnm	° C
1	Rio entrada salinas grandes	18° 22' 24.4"	97° 25' 48.1"	1509	31.0
2	Lavado de salinas	18° 22' 24.4"	97° 25' 45.1"	1516	39.2
3	Pozo-1 Enrique	18° 22' 24.0"	97° 25' 44.2"	1513	27.4
4	Pozo-2 Enrique	18° 22' 22.8"	97° 25' 43.6"	1518	26.3
5	Pozo Mezquite	18° 22' 13.6"	97° 25' 46.7"	1508	31.7
6	Pozo Brazo de oro	18° 22' 14.3"	97° 25' 46.1"	1507	29.6
7	Pozo Pacheco	18° 22' 14.1"	97° 25' 45.0"	1506	26.6
8	Pozo Izote	18° 22' 13.4"	97° 25' 43.2"	1502	26.3
9	Pozo Lorenzos	18° 22' 13.5"	97° 25' 43.3"	1502	25.3
10	Pozo Balsas	18° 22' 13.1"	97° 25' 42.1"	1505	26.1
11	Pozo Grande	18° 22' 11.7"	97° 25' 44.8"	1508	26.2
12	Pozo Colorado	18° 22' 10.4"	97° 25' 44.1"	1507	22.0
13	Pozo Sábila	18° 22' 10.2"	97° 25' 44.9"	1508	21.1
14	Pozo Cueva	18° 22' 11.6"	97° 25' 43.6"	1503	21.2
15	Pozo Taladro	18° 22' 10.7"	97° 25' 45.9"	1504	21.5
16	Pozo-1 Placita	18° 22' 10.2"	97° 25' 48.4"	1506	26.2
17	Pozo Verde	18° 22' 13.2"	97° 25' 46.2"	1502	26.0
18	Pozo Rincón	18° 22' 11.8"	97° 25' 41.7"	1494	21.8
19	Pozo los Castillo	18° 22' 11.5"	97° 25' 41.2"	1496	22.1
20	Pozo Cañón	18° 22' 09.4"	97° 25' 40.8"	1498	21.1
21	Pozo-1 Boquerón	18° 22' 08.9"	97° 25' 39.7"	1498	21.8
22	Pozo-2 Boquerón	18° 22' 09.9"	97° 25' 39.7"	1500	23.3
23	Pozo-2 Placita	18° 22' 09.1"	97° 25' 49.1"	1511	22.7
24	Pozo-1 los Santos	18° 22' 07.8"	97° 25' 48.8"	1515	22.4
25	Pozo Barranca del caracol	18° 22' 08.0"	97° 25' 49.6"	1512	23.5
26	Pozo Escurridero	18° 22' 07.8"	97° 25' 50.1"	1513	21.5
27	Pozo-2 los Santos	18° 22' 04.4"	97° 25' 51.2"	1516	22.5
28	Pozo Cirilo	18° 22' 04.4"	97° 25' 50.5"	1516	22.8
29	Pozo-2 Finca Santos	18° 22' 01.9"	97° 25' 50.8"	1523	24.5
30	Pozo-3 Finca Santos	18° 22' 01.8"	97° 25' 50.5"	1523	22.8
31	Pozo Agua Salada	18° 22' 01.4"	97° 25' 53.1"	1528	23.9
32	Pozo-1 Luis	18° 22' 00.7"	97° 25' 51.0"	1529	36.1
33	Pozo-2 Luis	18° 22' 00.9"	97° 25' 51.4"	1527	27.0
34	Pozo-1 Cecilio	18° 21' 58.5"	97° 25' 48.0"	1540	24.7
35	Pozo-2 Cecilio	18° 21' 57.4"	97° 25' 48.1"	1546	22.6

Cuadro 20....

No.	Sitio de muestreo	Coordenadas		Altitud msnm	Temperatura ° C
		N	W		
36	Pozo-3 Cecilio	18° 21' 57.3"	97° 25' 48.2"	1546	26.3
37	Pozo-4 Cecilio	18° 21' 56.7"	97° 25' 48.0"	1549	24.4
38	Pozo-5 Cecilio	18° 21' 57.1"	97° 25' 47.9"	1551	21.8
39	Pozo-6 Cecilio	18° 22' 00.1"	97° 25' 49.6"	1528	25.1
40	Pozo-1 Gregorio Rodríguez	18° 22' 00.7"	97° 25' 52.3"	1523	27.4
41	Pozo-2 Gregorio Rodríguez	18° 21' 59.1"	97° 25' 51.8"	1520	28.3
42	Pozo-3 Gregorio Rodríguez	18° 21' 58.3"	97° 25' 51.7"	1522	25.8
43	Pozo-4 Gregorio Rodríguez	18° 21' 57.8"	97° 25' 54.5"	1530	22.4
44	Pozo-5 Gregorio Rodríguez	18° 21' 57.5"	97° 25' 54.6"	1530	22.6
45	Pozo-1 Omobono	18° 22' 10.3"	97° 25' 54.8"	1529	25.8
46	Pozo-2 Omobono	18° 22' 10.4"	97° 25' 54.2"	1521	27.8
47	Pozo-3 Omobono	18° 22' 11.3"	97° 25' 53.8"	1521	24.6
48	Pozo-4 Omobono	18° 22' 10.6"	97° 25' 53.2"	1519	28.7
49	Pozo-5 Omobono	18° 22' 10.4"	97° 25' 52.8"	1522	27.0
50	Pozo-6 Omobono	18° 22' 10.8"	97° 25' 51.4"	1519	26.2
51	Pozo-1 Jacinto Salas	18° 20' 48.4"	97° 27' 0.03"	1511	23.0
52	Pozo-2 Jacinto Salas	18° 20' 48.4"	97° 26' 58.1"	1516	22.8
53	Pozo-3 Jacinto Salas	18° 20' 48.6"	97° 26' 57.4"	1520	23.3
54	Pozo Martimiano Salas	18° 20' 48.4"	97° 26' 57.0"	1521	20.5
55	Pozo-1 Juan Hernández	18° 20' 47.9"	97° 26' 57.1"	1521	19.6
56	Pozo-4 Jacinto Salas	18° 20' 48.2"	97° 26' 55.9"	1529	23.8
57	Pozo-5 Jacinto Salas	18° 20' 47.9"	97° 26' 55.5"	1534	21.3
58	Pozo-2 Juan Hernández	18° 20' 47.9"	97° 26' 59.4"	1505	20.4
59	Pozo Sauce	18° 19' 22.3"	97° 27' 06.4"	1424	25.3
60	Pozo José Carrillo Pérez	18° 19' 22.5"	97° 27' 06.3"	1424	23.8
61	Pozo-1 David	18° 19' 22.6"	97° 27' 04.3"	1426	20.8
62	Pozo-2 David	18° 19' 23.7"	97° 27' 03.6"	1425	20.1
63	Pozo-3 David	18° 19' 24.4"	97° 27' 06.3"	1422	23.4
64	Pozo-4 David	18° 19' 25.4"	97° 27' 07.8"	1424	23.5
65	Rio salado	18° 19' 25.5"	97° 27' 07.9"	1421	25.8
66	Pozo-1 San Pedro	18° 18' 59.4"	97° 26' 33.0"	1437	24.9
67	Pozo-2 San Pedro	18° 18' 59.3"	97° 26' 32.5"	1436	27.1
68	Pozo-3 San Pedro	18° 19' 01.0"	97° 26' 31.6"	1428	20.5
69	Pozo cantera arroyo	18° 19' 01.0"	97° 26' 30.9"	1426	24.8

En el cuadro anterior se observa que los sitios de muestreos se encuentran distribuidos únicamente en la zona de salinas del municipio de Zapotitlán salinas en Puebla. Iniciando con la entrada a las salinas, luego se continuó con el recorrido en los diferentes pozos, hasta por ultimo hacer la toma de muestra en el paraje llamado salinas el sauce.

5.2.2 Concentración iónica de la zona de salinas en Zapotitlán, Salinas Puebla

Mientras que en el cuadro 21, se presentan las concentraciones iónicas de las diferentes aguas superficiales de esta la zona 2.

Cuadro 21. Concentración iónica de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.

Sitio de muestreo	pH	C.E $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma Cationes	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma Aniones	% error	Σ ppm Σ mmol L ⁻¹	RSE mg L ⁻¹	
			mmol L ⁻¹					mmol L ⁻¹							RSC mg L ⁻¹	
1	7.52	18880.00	3.25	13.10	166.55	1.73	184.63	0.00	32.83	117.70	23.02	173.55	3.09		11486.00	
			65.13	159.30	3830.65	67.64		0.00	2002.63	4172.47	1105.65				11403.46	10814.00
			1.63	6.55	166.55	1.73		0.00	32.83	117.70	11.51				338.50	
2	9.21	523500.00	0.12	22.50	5103.88	125.00	5251.50	162.45	96.62	4442.44	182.38	4883.89	3.63		494720.00	
			2.40	273.60	117389.24	4887.50		4873.50	5893.82	157484.50	8759.71				299564.27	421605.00
			0.06	11.26	5103.88	125.00		81.23	96.62	4442.44	91.19				9951.67	
3	7.02	43300.00	1.29	14.28	402.12	5.75	423.44	0.00	85.50	255.62	61.21	402.33	2.56		32076.00	
			25.85	173.64	9248.76	224.83		0.00	5215.50	9061.73	2939.92				26890.23	28544.00
			0.65	7.14	402.12	5.75		0.00	85.50	255.62	30.61				787.39	
4	8.47	57400.00	1.48	1.72	563.00	9.15	575.35	18.00	88.00	345.52	83.56	535.08	3.63		42085.00	
			29.66	20.92	12949.00	357.77		540.00	5368.00	12248.68	4013.39				35527.41	39967.50
			0.74	0.86	563.00	9.15		9.00	88.00	345.52	41.78				1058.05	
5	9.58	22590.00	0.60	4.50	210.52	3.15	218.77	16.75	46.80	112.38	30.31	206.24	2.95		14142.50	
			12.02	54.72	4841.96	123.17		502.50	2854.80	3983.87	1455.79				13828.83	13407.50
			0.30	2.25	210.52	3.15		8.38	46.80	112.38	15.16				398.93	
6	9.18	21915.00	0.48	17.94	190.96	2.85	212.23	14.43	44.86	113.77	32.05	205.11	1.71		13480.00	
			9.62	218.15	4392.08	111.44		432.90	2736.46	4033.15	1539.36				13473.15	13510.00
			0.24	8.98	190.96	2.85		7.22	44.86	113.77	16.03				384.90	
7	7.71	27235.00	0.30	18.12	241.58	3.75	263.75	12.16	47.17	159.36	31.87	250.56	2.56		17805.00	
			6.01	220.34	5556.34	146.63		364.80	2877.37	5649.31	1530.72				16351.51	16730.00
			0.15	9.07	241.58	3.75		6.08	47.17	159.36	15.94				483.09	
8	8.52	11460.00	0.82	5.80	102.41	1.95	110.98	6.43	19.77	63.66	12.24	102.10	4.17		6785.00	
			16.43	70.53	2355.43	76.25		192.90	1205.97	2256.75	587.89				6762.14	6357.50
			0.41	2.90	102.41	1.95		3.22	19.77	63.66	6.12				200.44	
9	7.45	33780.00	4.16	18.24	299.89	4.85	327.14	0.00	53.16	211.24	39.84	304.24	3.63		21810.00	
			83.37	221.80	6897.47	189.64		0.00	3242.76	7488.46	1913.52				20037.00	20700.00
			2.08	9.13	299.89	4.85		0.00	53.16	211.24	19.92				600.27	
10	8.67	23475.00	1.04	10.96	211.24	4.10	227.34	18.40	38.94	128.52	23.29	209.15	4.17		14730.00	
			20.84	133.27	4858.52	160.31		552.00	2375.34	4556.03	1118.62				13774.94	14110.00
			0.52	5.48	211.24	4.10		9.20	38.94	128.52	11.65				409.65	
11	7.44	50050.00	2.31	6.71	465.66	10.02	484.70	0.00	95.00	291.16	69.46	455.62	3.09		35875.00	
			46.29	81.59	10710.18	391.78		0.00	5795.00	10321.62	3336.16				30682.63	33530.00
			1.16	3.36	465.66	10.02		0.00	95.00	291.16	34.73				901.08	

Cuadro 21....

Sitio de muestreo	pH	C.E $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma Cationes	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma Aniones	% error	Σ ppm Σ mmol L ⁻¹	RSE mg L ⁻¹	
			mmol L ⁻¹					mmol L ⁻¹							RSC mg L ⁻¹	
12	8.46	61800.00	1.76	11.56	592.50	10.20	616.02	33.40	117.30	352.89	81.63	585.22	2.56		44997.50	
			35.27	140.57	13627.50	398.82		1002.00	7155.30	12509.95	3920.69				38790.10	42405.00
			0.88	5.78	592.50	10.20		16.70	117.30	352.89	40.82					1137.07
13	7.64	67000.00	0.90	12.80	657.91	10.20	681.81	0.00	142.80	406.53	91.57	640.90	3.09		46960.00	
			18.04	155.65	15131.93	398.82		0.00	8710.80	14411.49	4398.11				43224.83	44035.00
			0.45	6.40	657.91	10.20		0.00	142.80	406.53	45.79					1270.08
14	8.44	32415.00	0.68	6.84	300.95	5.45	313.92	21.35	52.36	170.48	47.76	291.95	3.63		21107.50	
			13.63	83.17	6921.85	213.10		640.50	3193.96	6043.52	2293.91				19403.64	19977.50
			0.34	3.42	300.95	5.45		10.68	52.36	170.48	23.88					567.56
15	7.69	51850.00	1.36	9.94	486.85	8.90	507.05	0.00	99.80	284.83	97.07	481.70	2.56		36150.00	
			27.25	120.87	11197.55	347.99		0.00	6087.80	10097.22	4662.27				32540.96	35580.00
			0.68	4.97	486.85	8.90		0.00	99.80	284.83	48.54					934.57
16	8.54	43250.00	0.94	8.25	406.11	7.65	422.95	23.20	81.58	207.57	76.76	389.11	4.17		29865.00	
			18.84	100.32	9340.53	299.12		696.00	4976.38	7358.36	3686.78				26476.32	28750.00
			0.47	4.13	406.11	7.65		11.60	81.58	207.57	38.38					757.49
17	7.96	39100.00	2.22	9.14	363.85	7.15	382.36	0.00	62.20	224.02	69.37	355.59	3.63		26062.50	
			44.49	111.14	8368.55	279.57		0.00	3794.20	7941.51	3331.84				23871.30	25077.50
			1.11	4.57	363.85	7.15		0.00	62.20	224.02	34.69					697.59
18	8.69	27140.00	0.86	4.42	256.27	3.85	265.40	22.00	51.40	145.77	30.31	249.48	3.09		17437.50	
			17.23	53.75	5894.21	150.54		660.00	3135.40	5167.55	1455.79				16534.46	16627.50
			0.43	2.21	256.27	3.85		11.00	51.40	145.77	15.16					486.09
19	9.05	18660.00	0.20	1.90	177.03	3.35	182.48	12.26	35.47	109.70	19.10	176.53	1.66		11510.00	
			4.01	23.10	4071.69	130.99		367.80	2163.67	3888.87	917.37				11567.50	11022.50
			0.10	0.95	177.03	3.35		6.13	35.47	109.70	9.55					342.28
20	8.98	22475.00	0.20	0.56	213.65	3.25	217.66	15.65	38.62	124.14	31.39	209.80	1.84		13972.50	
			4.01	6.81	4913.95	127.08		469.50	2355.82	4400.76	1507.66				13785.59	13477.50
			0.10	0.28	213.65	3.25		7.83	38.62	124.14	15.70					403.56
21	7.74	43950.00	0.60	13.50	411.89	3.80	429.79	0.00	69.66	276.65	61.99	408.30	2.56		29992.50	
			12.02	164.16	9473.47	148.58		0.00	4249.26	9807.24	2977.38				26832.12	28467.50
			0.30	6.75	411.89	3.80		0.00	69.66	276.65	31.00					800.05
22	8.40	36450.00	0.35	6.50	344.70	4.90	356.45	25.35	59.08	198.82	48.02	331.27	3.66		24292.50	
			7.01	79.04	7928.10	191.59		760.50	3603.88	7048.17	2306.40				21924.69	23085.00
			0.18	3.25	344.70	4.90		12.68	59.08	198.82	24.01					647.61

Cuadro 21....

Sitio de muestreo	pH	C.E $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma Cationes	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma Aniones	% error	Σ ppm	RSE mg L ⁻¹	
			mmol _e L ⁻¹					mmol _e L ⁻¹						Σ mmol L ⁻¹	RSC mg L ⁻¹	
23	8.95	42400.00	0.20	2.40	401.92	6.10	410.62	29.41	73.05	207.79	79.84	390.09	2.56		29012.50	
			4.01	29.18	9244.16	238.51		882.30	4456.05	7366.16	3834.72				26055.08	28010.00
			0.10	1.20	401.92	6.10		14.71	73.05	207.79	39.92				744.79	
24	8.48	63650.00	0.30	19.14	588.67	8.30	616.41	44.12	109.58	305.97	119.76	579.43	3.09		46072.50	
			6.01	232.74	13539.41	324.53		1323.60	6684.38	10846.64	5752.07				38709.38	44180.00
			0.15	9.57	588.67	8.30		22.06	109.58	305.97	59.88				1104.18	
25	9.02	29070.00	0.48	8.61	266.84	5.60	281.53	19.85	49.31	143.20	55.09	267.45	2.56		19600.00	
			9.62	104.70	6137.32	218.96		595.50	3007.91	5076.44	2645.97				17796.42	18860.00
			0.24	4.31	266.84	5.60		9.93	49.31	143.20	27.55				506.97	
26	9.45	3850.00	0.22	1.20	35.53	0.70	37.65	3.58	6.51	21.80	4.64	36.53	1.51		2265.00	
			4.41	14.59	817.19	27.37		107.40	397.11	772.81	222.86				2363.74	2037.50
			0.11	0.60	35.53	0.70		1.79	6.51	21.80	2.32				69.36	
27	8.23	46650.00	0.92	3.42	440.94	6.50	451.78	11.00	66.70	249.13	88.81	415.64	4.17		31395.00	
			18.44	41.59	10141.62	254.15		330.00	4068.70	8831.66	4265.54				27951.70	30147.50
			0.46	1.71	440.94	6.50		5.50	66.70	249.13	44.41				815.35	
28	8.79	55150.00	0.18	2.76	525.33	11.05	539.32	44.40	94.96	280.27	98.12	517.75	2.04		39667.50	
			3.61	33.56	12082.59	432.06		1332.00	5792.56	9935.57	4712.70				34324.65	38250.00
			0.09	1.38	525.33	11.05		22.20	94.96	280.27	49.06				984.34	
29	8.75	34385.00	0.20	2.32	327.33	6.40	336.25	27.52	58.89	181.59	54.80	322.80	2.04		22472.50	
			4.01	28.21	7528.59	250.24		825.60	3592.29	6437.37	2632.04				21298.35	21550.00
			0.10	1.16	327.33	6.40		13.76	58.89	181.59	27.40				616.63	
30	9.03	26455.00	0.18	1.12	251.36	6.05	258.71	25.35	45.35	127.66	42.20	240.56	3.64		16972.50	
			3.61	13.62	5781.28	236.56		760.50	2766.35	4525.55	2026.87				16114.32	16487.50
			0.09	0.56	251.36	6.05		12.68	45.35	127.66	21.10				464.85	
31	8.49	69500.00	0.42	6.12	653.28	13.25	673.07	40.80	119.27	343.96	121.93	625.96	3.63		51322.50	
			8.42	74.42	15025.44	518.08		1224.00	7275.47	12193.38	5856.30				42175.50	49637.50
			0.21	3.06	653.28	13.25		20.40	119.27	343.96	60.97				1214.40	
32	7.28	58350.00	1.90	10.42	546.99	11.30	570.61	0.00	127.25	312.41	102.42	542.08	2.56		38827.50	
			38.08	126.71	12580.77	441.83		0.00	7762.25	11074.93	4919.23				36943.80	37407.50
			0.95	5.21	546.99	11.30		0.00	127.25	312.41	51.21				1055.33	
33	8.37	72250.00	0.92	8.36	685.51	11.75	706.54	28.20	120.30	377.91	123.61	650.02	4.17		53920.00	
			18.44	101.66	15766.73	459.43		846.00	7338.30	13396.91	5936.99				43864.45	52070.00
			0.46	4.18	685.51	11.75		14.10	120.30	377.91	61.81				1276.02	

Cuadro 21....

Sitio de muestreo	pH	C.E $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma Cationes	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma Aniones	% error	Σ ppm Σ mmol L ⁻¹	RSE mg L ⁻¹
			mmol _e L ⁻¹					mmol _e L ⁻¹							RSC mg L ⁻¹
34	7.66	57500.00	1.80	8.52	541.68	10.30	562.30	0.00	102.37	363.69	73.75	539.81	2.04		41542.50
			36.07	103.60	12458.64	402.73		0.00	6244.57	12892.81	3542.21		35680.64	39695.00	
			0.90	4.26	541.68	10.30		0.00	102.37	363.69	36.88		1060.08		
35	7.47	62800.00	1.92	9.56	590.65	12.00	614.13	0.00	129.40	366.69	87.33	583.42	2.56		45725.00
			38.48	116.25	13584.95	469.20		0.00	7893.40	12999.16	4194.46		39295.90	43805.00	
			0.96	4.78	590.65	12.00		0.00	129.40	366.69	43.67		1148.15		
36	8.50	51150.00	0.80	6.64	483.11	9.65	500.20	23.20	85.35	297.51	69.13	475.19	2.56		35505.00
			16.03	80.74	11111.53	377.32		696.00	5206.35	10546.73	3320.31		31355.01	33992.50	
			0.40	3.32	483.11	9.65		11.60	85.35	297.51	34.57		925.51		
37	7.96	54400.00	1.36	8.16	512.06	10.40	531.98	0.00	108.20	331.06	72.18	511.44	1.97		39075.00
			27.25	99.23	11777.38	406.64		0.00	6600.20	11736.08	3466.81		34113.58	37225.00	
			0.68	4.08	512.06	10.40		0.00	108.20	331.06	36.09		1002.57		
38	7.13	62300.00	2.72	10.08	584.04	12.40	609.24	0.00	132.20	325.57	102.73	560.50	4.17		45662.50
			54.51	122.57	13432.92	484.84		0.00	8064.20	11541.46	4934.12		38634.62	43180.00	
			1.36	5.04	584.04	12.40		0.00	132.20	325.57	51.37		1111.98		
39	8.62	51950.00	0.84	8.26	484.25	9.75	503.10	38.40	88.36	280.22	65.94	472.92	3.09		37045.00
			16.83	100.44	11137.75	381.23		1152.00	5389.96	9933.80	3167.10		31279.11	35610.00	
			0.42	4.13	484.25	9.75		19.20	88.36	280.22	32.97		919.30		
40	8.53	93400.00	1.06	8.06	881.00	14.40	904.52	54.67	166.35	502.34	105.71	829.07	4.35		49822.50
			21.24	98.01	20263.00	563.04		1640.10	10147.35	17807.95	5077.25		55617.95	47735.00	
			0.53	4.03	881.00	14.40		27.34	166.35	502.34	52.86		1648.84		
41	8.35	64350.00	0.98	4.96	612.55	10.80	629.29	43.35	114.78	347.88	91.82	597.83	2.56		33622.50
			19.64	60.31	14088.65	422.28		1300.50	7001.58	12332.35	4410.11		39635.42	30307.50	
			0.49	2.48	612.55	10.80		21.68	114.78	347.88	45.91		1156.57		
42	7.77	73250.00	1.12	6.88	696.02	12.30	716.32	0.00	130.84	431.27	104.07	666.18	3.63		40144.00
			22.44	83.66	16008.46	480.93		0.00	7981.24	15288.52	4998.48		44863.74	37980.00	
			0.56	3.44	696.02	12.30		0.00	130.84	431.27	52.04		1326.47		
43	7.07	81550.00	2.84	7.64	774.26	12.75	797.49	0.00	142.35	469.19	122.15	733.69	4.17		42330.00
			56.91	92.90	17807.98	498.53		0.00	8683.35	16632.79	5866.86		49639.32	40095.00	
			1.42	3.82	774.26	12.75		0.00	142.35	469.19	61.08		1464.87		
44	7.13	58900.00	4.28	10.08	551.78	9.85	575.99	0.00	127.00	356.18	73.84	557.02	1.67		42395.00
			85.77	122.57	12690.94	385.14		0.00	7747.00	12626.58	3546.54		37204.54	40065.00	
			2.14	5.04	551.78	9.85		0.00	127.00	356.18	36.92		1088.92		

Cuadro 21....

Sitio de muestreo	pH	C.E $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma Cationes	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma Aniones	% error	Σ ppm Σ mmol L ⁻¹	RSE mg L ⁻¹	
			mmol L ⁻¹					mmol L ⁻¹							RSC mg L ⁻¹	
45	8.97	18765.00	0.18	1.02	179.20	3.10	183.50	14.80	38.46	69.87	49.36	172.49	3.09		12040.00	
			3.61	12.40	4121.60	121.21		444.00	2346.06	2476.89	2370.76				11896.53	11137.50
			0.09	0.51	179.20	3.10		7.40	38.46	69.87	24.68				323.31	
46	7.93	44900.00	1.20	13.72	418.01	6.15	439.08	0.00	84.60	280.84	51.69	417.13	2.56		30795.00	
			24.05	166.84	9614.23	240.47		0.00	5160.60	9955.78	2482.67				27644.63	29402.50
			0.60	6.86	418.01	6.15		0.00	84.60	280.84	25.85				822.91	
47	8.21	43100.00	2.40	12.20	403.18	3.70	421.48	24.40	65.12	249.43	65.68	404.63	2.04		29300.00	
			48.10	148.35	9273.14	144.67		732.00	3972.32	8842.29	3154.61				26315.48	26542.50
			1.20	6.10	403.18	3.70		12.20	65.12	249.43	32.84				773.78	
48	8.89	32520.00	0.30	1.63	308.36	4.65	314.94	22.30	58.09	161.55	57.25	299.19	2.56		20850.00	
			6.01	19.82	7092.28	181.82		669.00	3543.49	5726.95	2749.72				19989.08	20187.50
			0.15	0.82	308.36	4.65		11.15	58.09	161.55	28.63				573.39	
49	8.58	36050.00	0.72	1.32	341.92	5.16	349.12	18.06	42.36	204.20	63.55	328.17	3.09		23900.00	
			14.43	16.05	7864.16	201.76		541.80	2583.96	7238.89	3052.31				21513.35	23010.00
			0.36	0.66	341.92	5.16		9.03	42.36	204.20	31.78				635.47	
50	7.36	30230.00	2.45	6.95	276.61	6.75	292.76	0.00	69.16	132.78	76.18	278.12	2.56		20382.50	
			49.10	84.51	6362.03	263.93		0.00	4218.76	4707.05	3658.93				19344.30	18942.50
			1.23	3.48	276.61	6.75		0.00	69.16	132.78	38.09				528.09	
51	9.60	43350.00	0.18	1.36	412.48	9.90	423.92	26.12	78.16	197.91	92.06	394.25	3.63		31915.00	
			3.61	16.54	9487.04	387.09		783.60	4767.76	7015.91	4421.64				26883.19	29992.50
			0.09	0.68	412.48	9.90		13.06	78.16	197.91	46.03				758.31	
52	9.22	49550.00	0.28	0.68	473.49	10.10	484.55	29.77	83.82	247.58	84.62	445.79	4.17		35720.00	
			5.61	8.27	10890.27	394.91		893.10	5113.02	8776.71	4064.30				30146.19	33994.00
			0.14	0.34	473.49	10.10		14.89	83.82	247.58	42.31				872.67	
53	9.11	23520.00	0.26	1.24	221.68	4.60	227.78	13.50	36.34	119.82	42.17	211.83	3.63		15475.00	
			5.21	15.08	5098.64	179.86		405.00	2216.74	4247.62	2025.43				14193.57	14190.00
			0.13	0.62	221.68	4.60		6.75	36.34	119.82	21.09				411.03	
54	8.78	26555.00	0.28	1.08	251.92	6.40	259.68	18.46	45.57	133.70	48.97	246.70	2.56		18637.50	
			5.61	13.13	5794.16	250.24		553.80	2779.77	4739.67	2352.03				16488.41	16762.50
			0.14	0.54	251.92	6.40		9.23	45.57	133.70	24.49				471.99	
55	9.01	24170.00	0.30	0.80	228.46	6.80	236.36	13.91	37.07	122.23	48.97	222.18	3.09		16327.50	
			6.01	9.73	5254.58	265.88		417.30	2261.27	4333.05	2352.03				14899.85	15092.50
			0.15	0.40	228.46	6.80		6.96	37.07	122.23	24.49				426.55	

Cuadro 21....

Sitio de muestreo	pH	C.E $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma Cationes	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma Aniones	% error	Σ ppm Σ mmol L ⁻¹	RSE mg L ⁻¹
			mmol L ⁻¹					mmol L ⁻¹							RSC mg L ⁻¹
56	6.96	37600.00	4.16	9.62	344.96	8.95	367.69	0.00	85.76	185.63	77.92	349.31	2.56		26767.50
			83.37	116.98	7934.08	349.95		0.00	5231.36	6580.58	3742.50			24038.81	24430.00
			2.08	4.81	344.96	8.95		0.00	85.76	185.63	38.96			671.16	
57	7.24	29765.00	2.24	7.44	271.43	7.15	288.26	0.00	77.88	152.41	46.44	276.73	2.04		20752.50
			44.89	90.47	6242.89	279.57		0.00	4750.68	5402.93	2230.51			19041.94	18922.50
			1.12	3.72	271.43	7.15		0.00	77.88	152.41	23.22			536.93	
58	9.31	64650.00	0.18	0.52	620.57	10.95	632.22	37.78	110.92	341.90	110.01	600.61	2.56		39132.00
			3.61	6.32	14273.11	428.15		1133.40	6766.12	12120.36	5283.78			40014.84	36670.00
			0.09	0.26	620.57	10.95		18.89	110.92	341.90	55.01			1158.59	
59	8.38	45600.00	0.60	6.40	427.43	11.50	445.93	27.82	78.75	254.28	67.24	428.09	2.04		33240.00
			12.02	77.82	9830.89	449.65		834.60	4803.75	9014.23	3229.54			28252.50	30042.50
			0.30	3.20	427.43	11.50		13.91	78.75	254.28	33.62			822.99	
60	8.92	19745.00	0.30	1.84	185.80	5.15	193.09	11.96	33.86	108.70	28.91	183.43	2.57		12595.00
			6.01	22.37	4273.40	201.37		358.80	2065.46	3853.42	1388.55			12169.37	12070.00
			0.15	0.92	185.80	5.15		5.98	33.86	108.70	14.46			355.02	
61	7.34	51100.00	2.18	7.14	472.25	13.30	494.87	0.00	88.60	289.67	86.91	465.18	3.09		36225.00
			43.69	86.82	10861.75	520.03		0.00	5404.60	10268.80	4174.29			31359.98	35062.50
			1.09	3.57	472.25	13.30		0.00	88.60	289.67	43.46			911.94	
62	8.68	20000.00	0.45	1.48	184.66	7.10	193.69	12.71	34.39	111.86	28.10	187.06	1.74		11920.00
			9.02	18.00	4247.18	277.61		381.30	2097.79	3965.44	1349.64			12345.97	11355.00
			0.23	0.74	184.66	7.10		6.36	34.39	111.86	14.05			359.38	
63	7.66	34955.00	2.82	9.82	320.74	8.45	341.83	0.00	63.50	227.12	30.70	321.32	3.09		23555.00
			56.51	119.41	7377.02	330.40		0.00	3873.50	8051.40	1474.52			21282.76	22592.50
			1.41	4.91	320.74	8.45		0.00	63.50	227.12	15.35			641.49	
64	8.30	122500.00	0.22	10.64	1155.54	19.95	1186.35	72.16	219.58	695.75	139.54	1127.03	2.56		68605.00
			4.41	129.38	26577.42	780.05		2164.80	13394.38	24664.34	6702.11			74416.88	65790.00
			0.11	5.32	1155.54	19.95		36.08	219.58	695.75	69.77			2202.10	
65	7.84	1711.00	0.97	3.27	12.13	0.36	16.73	0.00	7.60	6.34	2.25	16.19	1.64		920.00
			19.44	39.76	278.99	14.08		0.00	463.60	224.75	108.07			1148.69	727.50
			0.49	1.64	12.13	0.36		0.00	7.60	6.34	1.13			29.68	
66	8.76	16945.00	0.86	1.32	157.98	5.55	165.71	9.52	29.26	96.85	23.45	159.08	2.04		11014.00
			17.23	16.05	3633.54	217.01		285.60	1784.86	3433.33	1126.30			10513.93	10454.00
			0.43	0.66	157.98	5.55		4.76	29.26	96.85	11.73			307.22	

Cuadro 21....

Sitio de muestreo	pH	C.E $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma Cationes	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma Aniones	% error	Σ ppm Σ mmol L ⁻¹	RSE mg L ⁻¹	
			mmol L ⁻¹					mmol L ⁻¹							RSC mg L ⁻¹	
67	8.64	95650.00	1.12	7.62	904.82	12.75	926.31	55.76	169.68	505.88	139.41	870.73	3.09		50402.50	
			22.44	92.66	20810.86	498.53		1672.80	10350.48	17933.45	6695.86				58077.08	48832.50
			0.56	3.81	904.82	12.75		27.88	169.68	505.88	69.71				1695.09	
68	8.86	37350.00	0.70	3.97	351.03	9.55	365.25	21.74	66.18	188.53	74.19	350.64	2.04		25752.50	
			14.03	48.28	8073.69	373.41		652.20	4036.98	6683.39	3563.35				23445.31	25220.00
			0.35	1.99	351.03	9.55		10.87	66.18	188.53	37.10				665.59	
69	7.57	15490.00	4.89	4.68	136.76	5.15	151.48	0.00	39.05	92.77	13.60	145.42	2.04		9900.00	
			98.00	56.91	3145.48	201.37		0.00	2382.05	3288.70	653.21				9825.70	9112.50
			2.45	2.34	136.76	5.15		0.00	39.05	92.77	6.80				285.32	

5.2.3 Distribución de los cationes y aniones en las aguas

En la figura 19, el área bajo la curva muestra la concentración de cada ion, siendo por parte de cationes; el Sodio con la mayor dominancia (Na⁺) con una concentración de 12.13 mmol_cL⁻¹ a 1155.54 mmol_cL⁻¹, y por parte de aniones; el cloro (Cl⁻) con una concentración de 6.34 mmol_cL⁻¹ a 695.75 mmol_cL⁻¹, siguen de menor proporción y en pocas muestras corresponde el ion bicarbonato (HCO₃⁻) con una concentración de 6.51 mmol_cL⁻¹ a 219.58 mmol_cL⁻¹.

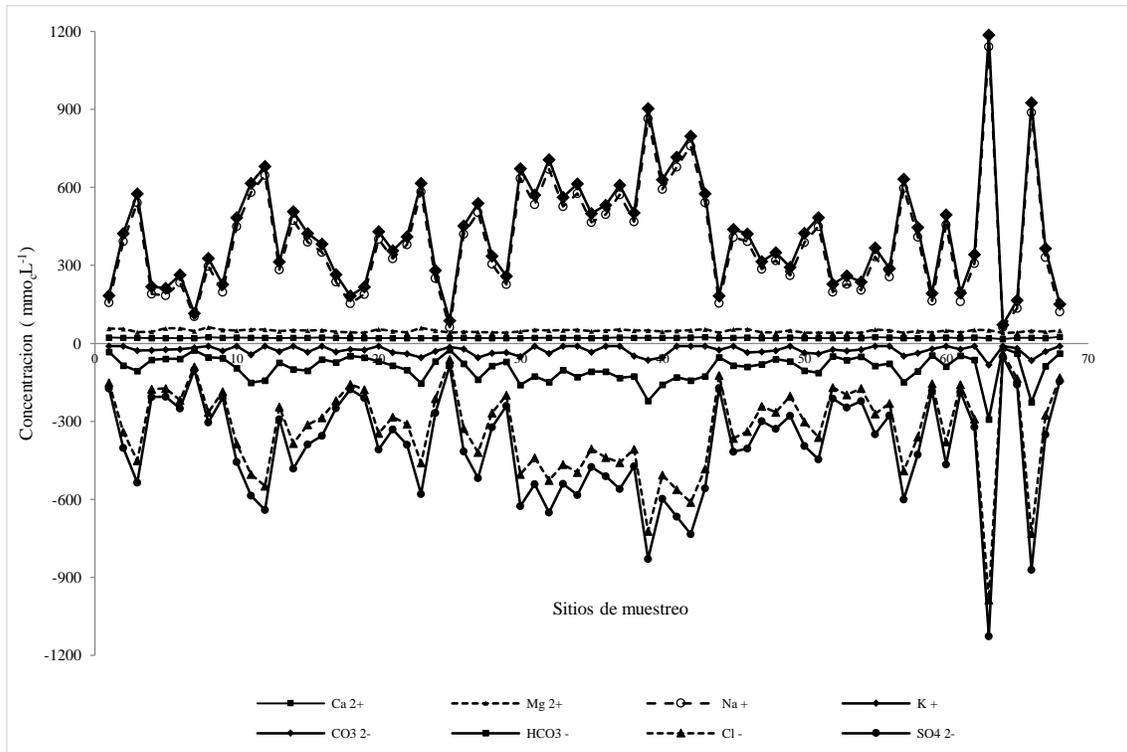


Figura 19. Distribución de iones (mmol_c L⁻¹) de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.

5.2.4 Relación entre la conductividad eléctrica determinada teóricamente y la conductividad eléctrica determinada experimentalmente

Los valores de conductividad eléctrica de diferentes soluciones salinas es proporcional a las concentraciones iónicas de estas mismas soluciones.

La relación de la CE teórica y experimental fue de 1.120 para estos dato, como se muestra en la figura 20, El intervalo de aceptación establecido por este método de comprobación de datos analíticos es de $0.9 < CE_{teórica} / CE_{experimental} < 1.1$, lo que nos indica que los datos analíticos obtenidos en ese trabajo son correctos.

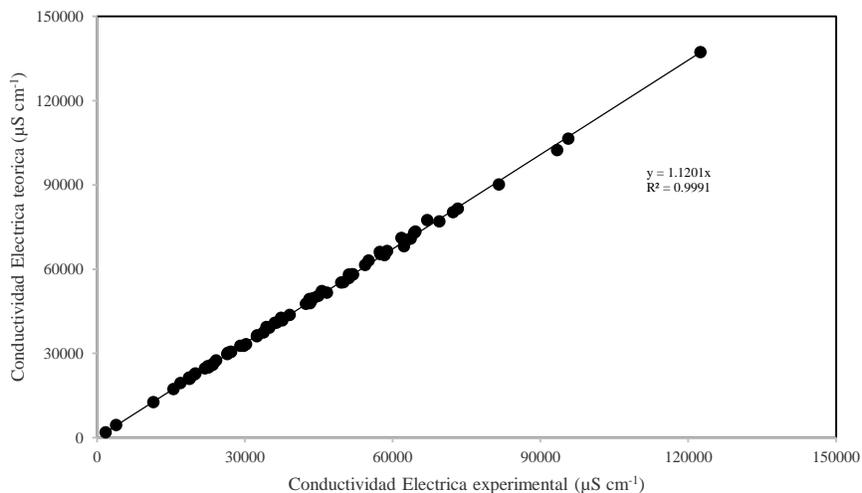


Figura 20. Relación conjunta entre la conductividad eléctrica teórica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y la experimental ($\mu\text{S cm}^{-1}$), de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.

5.2.5 Relación de mg L^{-1} Solidos totales disueltos (STD) analíticos con respecto a la CE expresada en $\mu\text{S cm}^{-1}$

Se ha señalado que esta relación funcional $\text{mg L}^{-1} = f a \text{ CE}$, en su proporcionalidad depende de la pendiente, cuyos valores que adquiere dependen del tipo de salinidad. Para diferentes tipos de sales puras y tipos de salinidad, los valores de la pendiente varían de 0.580-1.250 cuando la conductividad eléctrica está expresada en $\mu\text{S cm}^{-1}$.

En la Figura 21, se presenta la relación funcional entre las concentraciones de las sales solubles de las aguas naturales y sus valores correspondientes de la conductividad eléctrica: $\text{mg L}^{-1} = f a \text{ CE}$. El valor de la pendiente (a) encontrada es de 0.6142, que corresponde a aguas con una concentración considerable de iones sodio.

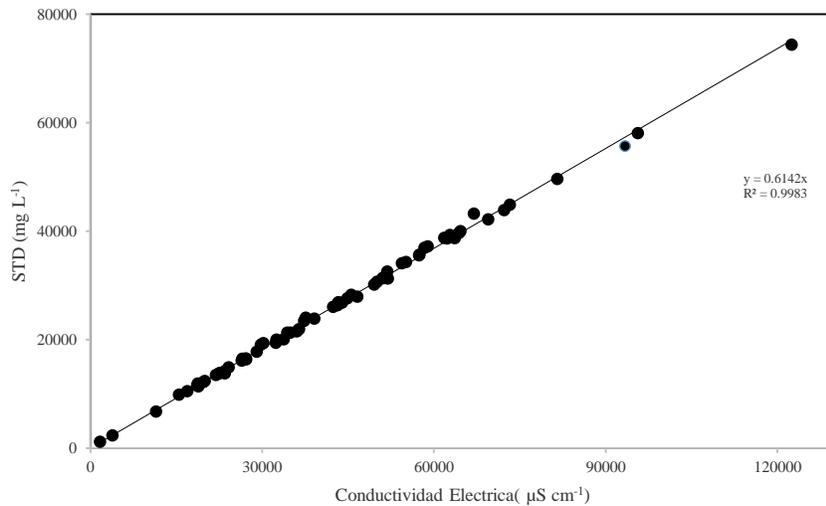


Figura 21. Relación conjunta entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y los STD (mg L^{-1}) de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.

5.2.6 Relación de la suma de cationes y de aniones ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$) con la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de las aguas superficiales.

Cabe enfatizar que la electroneutralidad siempre se debe observar en los iones. Conocer los valores de la relación funcional de cationes o de aniones $\text{mmol}_c \text{L}^{-1} = f \text{a CE}$ es muy importante, ya que en las determinaciones analíticas de las sumas de cationes o de aniones, éstas deben ser aproximadamente iguales, tomando en cuenta los porcentajes correspondientes permisibles de error (Richards, 1973; Eaton et al., 1995).

A continuación se presentan los valores de la relación funcional $\text{mmol}_c \text{L}^{-1} = f \text{a CE}$, para cationes y aniones de las aguas naturales. En la Figura 22, el valor de la pendiente para cationes es de 0.0098 y en la Figura 23, su valor de aniones es de 0.0092 para las diferentes aguas.

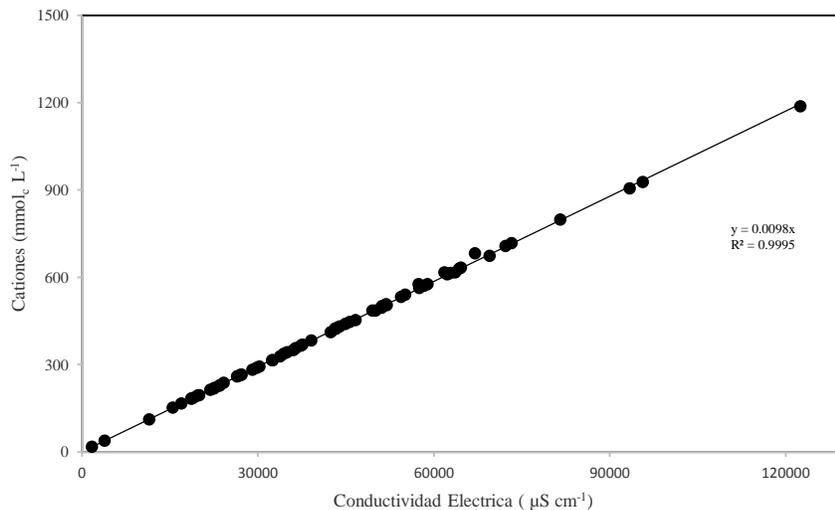


Figura 22. Relación conjunta entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y cationes ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$), de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.

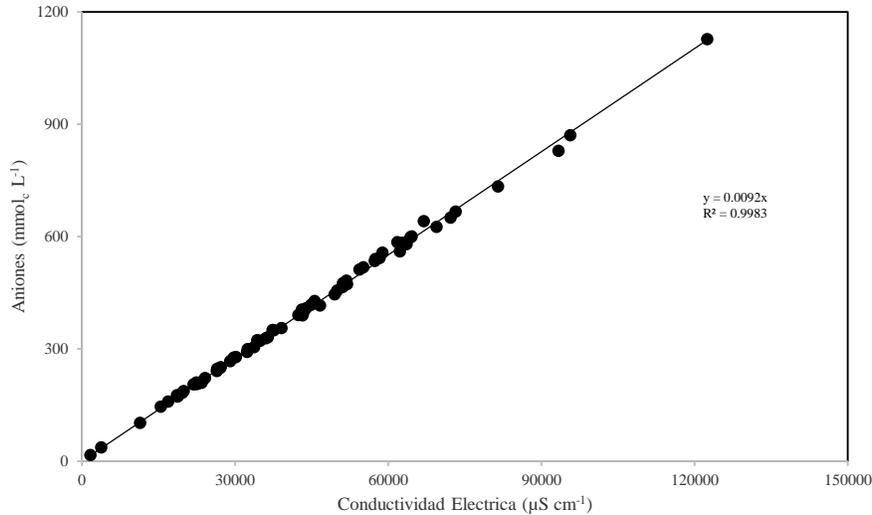


Figura 23. Relación conjunta entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y aniones (mmolc L^{-1}) de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.

5.2.7 Relación de la presión osmótica (en atm) con la conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$)

La presión osmótica es una propiedad coligativa de las soluciones salinas. El efecto osmótico de las soluciones acuosas y extractos de suelo de los suelos salinos es proporcional a su concentración de solutos. En muchos casos la presión osmótica es la que condiciona la salinidad de las diferentes aguas naturales y extractos de suelo. El efecto osmótico de las soluciones acuosas está relacionado con la concentración total de sales, y no tanto con las concentraciones específicas de uno u otro componente.

La presión osmótica de la solución del medio debe considerarse muy importante debido a su influencia en la absorción del agua por las plantas. Los efectos osmóticos se hacen evidentes en los cultivos, de manera general, mediante retraso del crecimiento, asociado con plantas de pocas hojas y hojas pequeñas.

La presión osmótica (π) de una solución es la presión que se requiere para detener la ósmosis; ésta se expresa en atmósferas, y está formulada teóricamente por:

$$\pi = cRT$$

Donde:

T = Temperatura absoluta (K)

c = Molaridad de la solución (mol L⁻¹)

R = Constante de los gases (0.082057 L atm/K mol)

En la figura 24, el coeficiente 0.00043 se obtiene al relacionar la presión osmótica teórica ($\pi_{\text{Teórica}}$) en atm y la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$, $\pi_{\text{Teórica}} = f \text{ a CE}$.

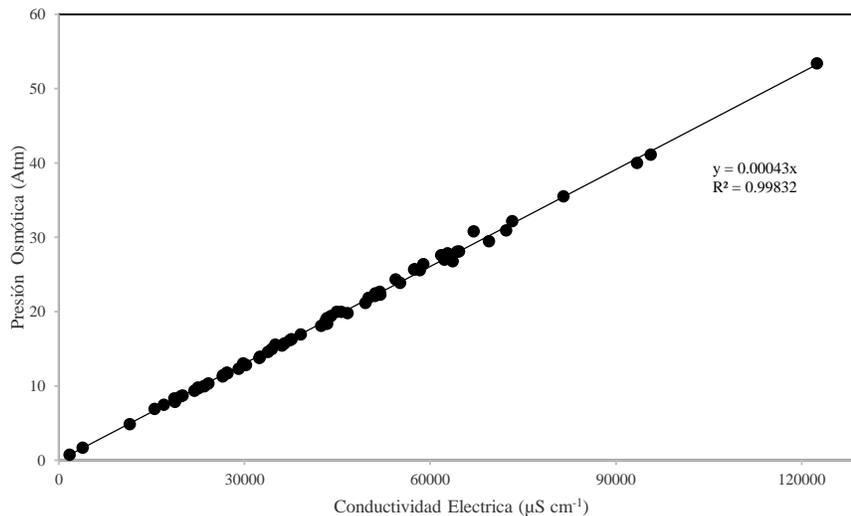


Figura 24. Relación entre la presión osmótica teórica en atm y la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$, de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.

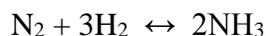
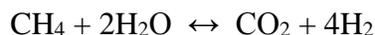
5.2.8 Contenido de nitrógeno, fósforo, boro y silicio en las aguas en las salinas, Puebla

5.2.8.1 Contenido de Nitrógeno en las aguas en las salinas de Puebla

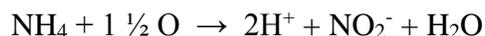
Se determinó el contenido de N-NO₃⁻ en las aguas superficiales y subterráneas de las aguas de pozos, sobre todo porque las aguas subterráneas podrían tener alguna influencia de los procesos volcánicos que ocurrieron en el Pli-Pleistoceno.

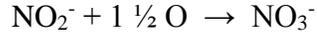
Enseguida se presenta el ciclo del nitrógeno en condiciones aeróbicas y anaeróbicas.

Obtención del amoniaco:

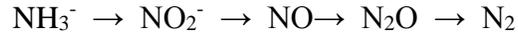


Oxidación del amonio:





Reducción de nitratos:



En la Figura 25, se presenta la concentración de N-NO₃⁻ expresados en mg L⁻¹ en todos los sitios de muestreo. En el muestreo, se tienen valores de contenido de nitrógeno ≤ 11.68 mg L⁻¹.

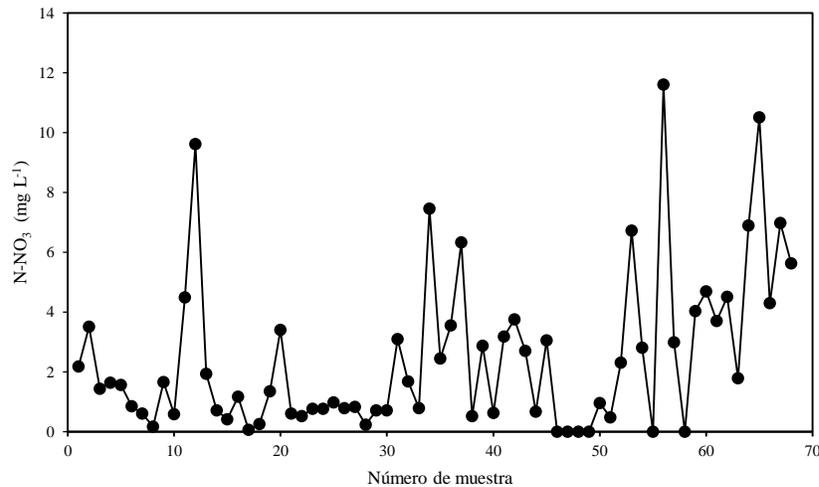


Figura 25. Contenido de Nitrógeno de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.

5.2.8.1 Contenido de Fosforo en las aguas en las salinas de Puebla

El fósforo, como el nitrógeno, es un nutriente esencial para la vida. Su exceso en el agua provoca eutrofización. El fósforo total incluye distintos compuestos como diversos ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico. La determinación se hace convirtiendo todos ellos en ortofosfatos que son los que se determinan por análisis químico.

En la Figura 26, se presenta la concentración de fosfatos expresados en mg L⁻¹ en todos los sitios de muestreo. En el muestreo, se tienen valores de contenido de fósforo ≤ 2.84 mg L⁻¹.

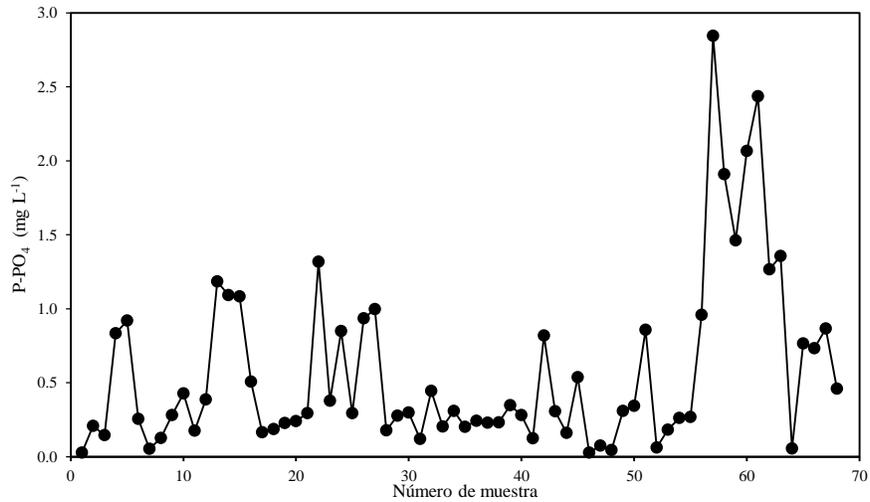


Figura 26. Concentración de Fosfatos (mg L^{-1}) de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.

5.2.8.3 Contenido de boro en las aguas en las salinas de Puebla.

La mayoría de las aguas superficiales contienen cantidades aceptables de boro, pero las aguas de los pozos profundos, de algunas áreas agrícolas contienen cantidades tóxicas de boro.

En la Figura 27, se presenta la concentración de boro expresados en mg L^{-1} en todos los sitios de muestreo. En el muestreo, se tienen valores de contenido de boro más alto sitio 85, 91,94 con 255.64 mg L^{-1} , 308.73 mg L^{-1} y 221.43 mg L^{-1} respectivamente.

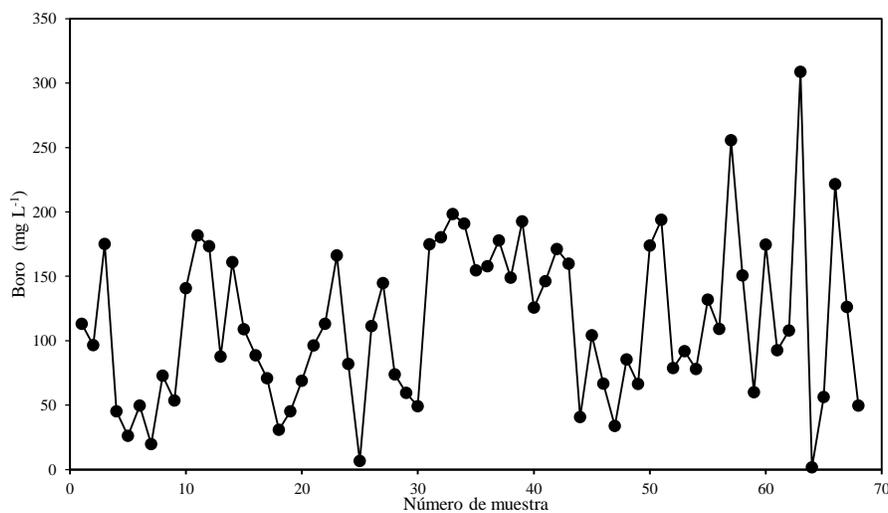


Figura 27. Concentración de Boro (mg L^{-1}) de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.

5.2.8.4 Contenido de sílice en las aguas en las salinas de Puebla.

El silicio como segundo elemento más abundante del planeta, se encuentra presente en la mayoría de las aguas. Muchas de las aguas naturales presentan concentraciones $<10 \text{ mg L}^{-1}$, sin embargo, se pueden encontrar aguas con presencia del silicio en cantidades mayores a 80 mg L^{-1} , como por ejemplo las aguas volcánicas, y aunque no presenta efectos tóxicos conocidos, el análisis del silicio en las aguas para riego ayuda a evitar la formación de depósitos duros de este elemento en el suelo agrícola.

Los minerales de silicio son insolubles en pH bajos, y la solubilidad de estos aumenta mínimamente en intervalos de $\text{pH}= 2.0 - 9.0$. Arriba de un $\text{pH}= 9.0$ los minerales del silicio se solubilizan considerablemente.

En la Figura 28, se presentan los contenidos de SiO_2 en las muestras de agua de las aguas superficiales de las salinas de Puebla.

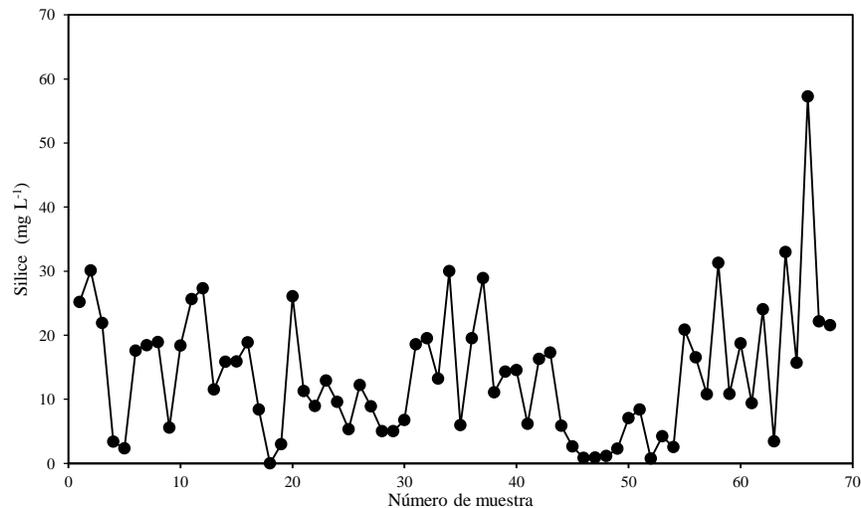


Figura 28. Concentración de Silicio (mg L^{-1}) de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.

La presencia de silicio en las muestras de agua del muestreo tiene la concentración más alta en la muestra número 66 con una concentración de 57.27 mg L^{-1} , mientras que los demás valores están en un rango $\leq 32.95 \text{ mg L}^{-1}$.

5.2.9 Clasificación hidrogeoquímica de las aguas de las salinas en Puebla

Mediante el diagrama triangular de Piper es ideal para representar seis componentes, como enseguida se señala; Ca, Mg y (Na+K), ($\text{CO}_3 + \text{HCO}_3$), Cl y SO_4 . Cuando se llevan a cabo las graficaciones de acuerdo con Piper (1944), en estas gráficas se pueden representar muchos análisis, sin dar motivo a una confusión, y es una de sus mayores ventajas.

Por último, sólo se debe señalar que, las aguas que son geoquímicamente similares, se presentan agrupadas en áreas bien definidas (Custodio y Llamas, 1996).

En las Figuras 29, se presentan los diagramas de Piper, donde se presenta la ubicación geoquímica de las fuentes de las aguas de las salinas en Puebla.

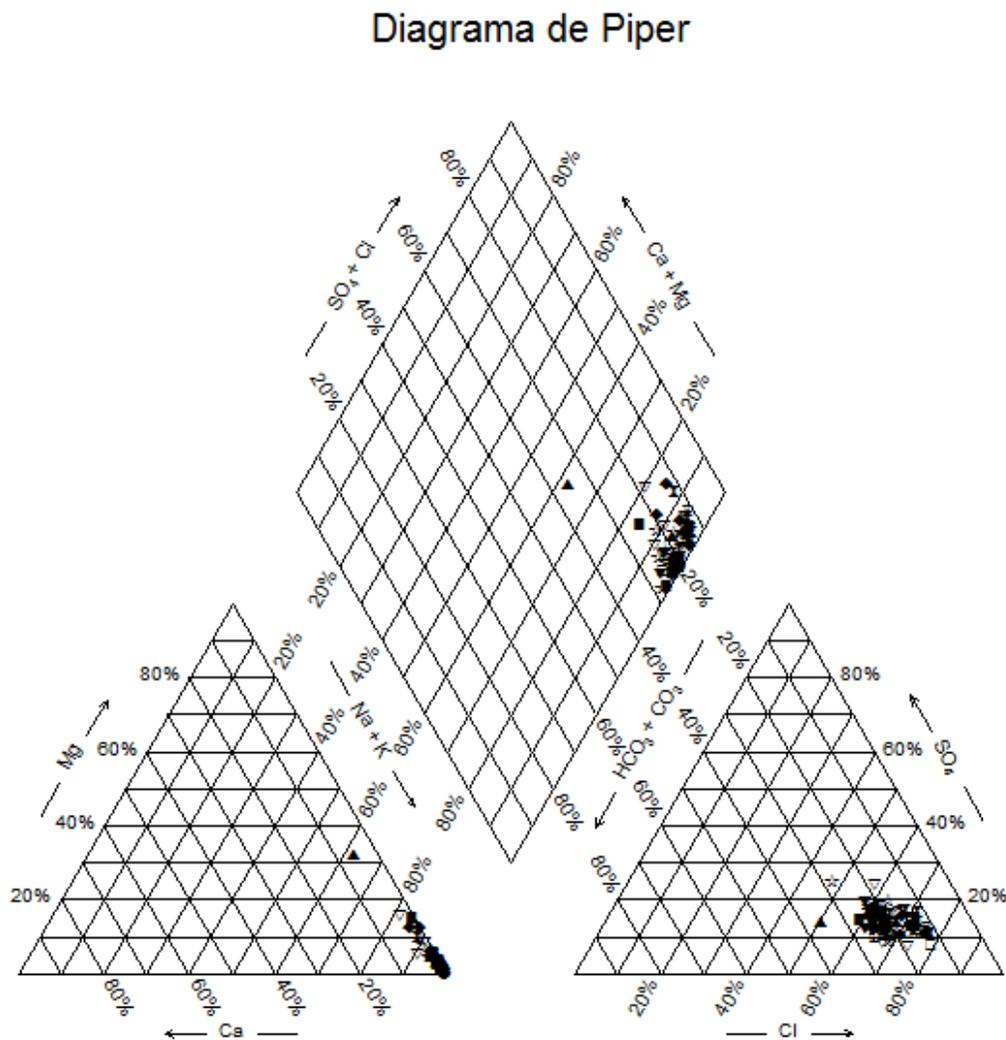


Figura 29. Clasificación hidrogeoquímica de las aguas en Zapotitlán salinas, Puebla.

Para este apartado de zona de las salinas existe una predominancia catión de tipo sódica y anión tipo clorada por lo que las aguas clasificadas como cloradas – sódicas lo que nos indica que se hace la extracción de la sal de cloruro de sodio (NaCl).

5.3 VALLE ORIENTAL, VERACRUZ

También conocidos como Axalapazcos, maars o lagos cráter de la Cuenca del Oriental por lo que se denomina con este nombre a ciertas estructuras volcánicas que tienen forma de cono y en cuyo cráter inactivo se ha formado un lago. El cuerpo de agua puede haberse formado, ya sea por corrientes subterráneas de agua o por las aguas de precipitación pluvial, siempre que el fondo del cráter presente condiciones impermeables. Según Branco (1984), citado por Reyes (1979), un maar (lago cráter) es una depresión resultante de varias erupciones esporádicas y cuyo cráter se ha llenado de agua formando un lago. Se distinguen cuatro tipos de maars: a) maar de tobas; b) maar de basaltos, c) maar de gases, y d) maar falso.

5.3.1 Localización geográfica de los lagos cráter

En México se tienen lagos cráteres formados en cuencas de origen volcánico, como las que se encuentran en las cercanías del Valle de Santiago, el lago cráter de Tacámbaro en el estado de Guanajuato, las calderas del Valle de México y los lagos cráter de la Cuenca del Oriental en el estado de Puebla. Los lagos cráter en el estado de Puebla se llaman Axalapazcos o vasijas de arena con agua. En los Llanos de San Andrés se localizan los lagos cráter de: Aljojuca y San Miguel Tecuitlapa. En los Llanos de San Juan se ubican los lagos cráter de: Alchichica, Atexcac, La Preciosa y Quechulac.

En el Cuadro 22, se presentan datos de las coordenadas y altimetría de los lagos cráter.

Cuadro 22. Localización de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

No.	Sitio de muestreo	Coordenadas		Altitud msnm	Temperatura ° C
		N	W		
1	Lago Cráter de Alchichica, Puebla	19° 24' 35.7"	97° 23' 57.6"	2350	20.8
2	Lago Cráter de Aljojuca, Puebla	19° 05' 30.8"	97° 31' 50.1"	2378	20.0
3	Lago Cráter San Miguel Tecuitlapa, Puebla	19° 07' 25.2"	97° 32' 36.2"	2371	18.5
4	Lago Cráter San Luis Atexcac, Puebla	19° 20' 14.5"	97° 26' 46.3"	2471	21.0
5	Lago Cráter La preciosa, Puebla	19° 22' 28.3"	97° 23' 00.8"	2347	20.2
6	Lago Cráter Quechulac, Puebla	19° 22' 40.0"	97° 21' 20.2"	2348	20.9

Algunas de las características de los lagos cráter que se encuentran en la Cuenca del Oriental Cuadro 23, de acuerdo con Yáñez y García (1982), son:

Cuadro 23. Características principales de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

Lago cráter	Localidad	Tipo de explosión	Nombre local	Profundidad (m)	Dimensiones (km)
Alchichica	Poblado de Alchichica	Freática	Axalapazco	70	2.50 x 2.00
Quechulac	Poblado de Quechulac	Freática	Axalapazco	44	1.25 x 1.00
La Preciosa	Al sur de Chichicuautila	Freática	Axalapazco	64	1.50 x 1.00
Atexcac	Poblado de San Luis Atexcac	Freática	Axalapazco	44	1.25 x 1.00
San Miguel Tecuitlapa	Poblado de San Miguel Tecuitlapa	Freáto-magmática	Axalapazco	8	1.50 x 1.25
Aljojuca	Poblado de Aljojuca	Freática	Axalapazco	54	1.25 x 1.00

5.3.2 Composición iónica de las aguas

Los tipos de aguas, encontrados en los lagos cráter, que desarrollan diferentes tipos de salinización son: 1. Del tipo clorhídrico ($Cl/SO_4 > 2$), cuatro muestras, San Miguel Tecuitlapa, Atexcac, Quechulac y Alchichica; 2. Del tipo sulfático-clorhídrico ($Cl/SO_4 = 1.0-2.0$), una muestra, el lago cráter La Preciosa; y 3. Del tipo clorhídrico-sulfático ($Cl/SO_4 = 0.2-1.0$), una muestra, el lago cráter de Alchichica. Cuadro 24.

Cuadro 24. Concentración iónica de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Sitio de muestreo	pH	C.E $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma Cationes	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma Aniones	% Error	Σ ppm Σ mmol L ⁻¹	STD Σ mg L ⁻¹
			mmolL ⁻¹					mmol L ⁻¹							
1	9.20	14115.00	0.42	2.84	127.22	7.55	138.03	7.90	24.29	82.41	19.46	134.06	1.46	9017.50	
			8.42	34.53	2926.06	295.21		237.00	1481.69	2921.43	934.66		8839.00		
			0.21	1.42	127.22	7.55		3.95	24.29	82.41	9.73		256.78		
2	9.3	1329.50	0.10	1.20	11.00	0.71	13.01	1.76	4.04	6.08	0.74	12.62	1.52	752.50	
			2.00	14.59	253.00	27.76		52.80	246.44	215.54	35.54		847.68		
			0.05	0.60	11.00	0.71		0.88	4.04	6.08	0.37		23.73		
3	9.60	4300.00	0.15	0.80	38.80	2.30	42.05	4.69	15.17	19.21	1.84	40.91	1.37	2787.50	
			3.01	9.73	892.40	89.93		140.70	925.37	680.99	88.38		2830.50		
			0.08	0.40	38.80	2.30		2.35	15.17	19.21	0.92		79.22		
4	8.90	12780.00	0.22	2.32	118.24	4.20	124.98	7.14	22.95	83.64	7.63	121.36	1.47	8962.50	
			4.41	28.21	2719.52	164.22		214.20	1399.95	2965.04	366.47		7862.02		
			0.11	1.16	118.24	4.20		3.57	22.95	83.64	3.82		237.69		
5	9.20	2354.50	0.68	6.63	15.10	0.62	23.03	2.12	7.15	11.03	2.06	22.36	1.48	1504.00	
			13.63	80.62	347.30	24.24		63.60	436.15	391.01	98.94		1455.50		
			0.34	3.32	15.10	0.62		1.06	7.15	11.03	1.03		39.65		
6	9.30	918.00	0.26	2.58	5.75	0.39	8.98	0.82	2.79	4.54	0.52	8.67	1.76	542.50	
			5.21	31.37	132.25	15.25		24.60	170.19	160.94	24.98		564.79		
			0.13	1.29	5.75	0.39		0.41	2.79	4.54	0.26		15.56		

5.3.3 Distribución de los cationes y aniones en las aguas

Las concentraciones de los iones en estos lagos cráter de Quechulac, Aljojuca, La Preciosa, Tecuitlapa, son de baja concentración siendo estas como sigue: Quechulac 542.5 mg L⁻¹, Aljojuca 752.5 mg L⁻¹, La Preciosa 1504.0 mg L⁻¹, Tecuitlapa 2787.5 mg L⁻¹mg L⁻¹. Mientras que las aguas de los lagos cráter de Alchichica y de Atexcac son de alta concentración y estas aguas guardan una relación con los procesos hidrotermales. Las concentraciones de las aguas de los lagos cráter de Alchichica y de Atexcac son: Atexcac 8962.5 mg L⁻¹Alchichica igual a 9017.5 mg L⁻¹.

En la Figura 30, se presenta la distribución iónica de los lagos cráter.

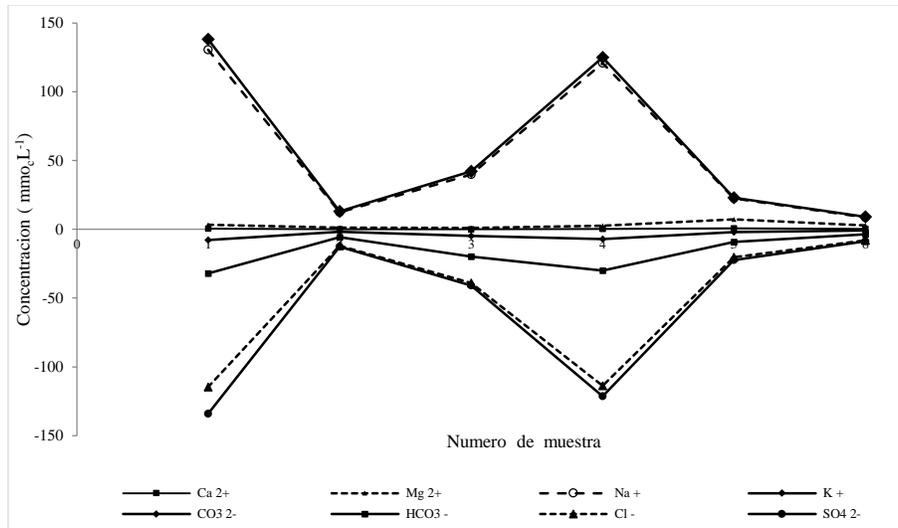


Figura 30. Diagrama de distribución iónica de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental.

5.3.4 Composición de las sales hipotéticas de los lagos cráter

En las Figura 31 se presentan la composición iónica, expresada en porcentaje de los $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, de cationes y de aniones de los diferentes lagos cráter.

Para mostrar la diferencia de la composición iónica, en sus diferentes concentraciones, de los lagos cráter y a su vez señalar que las aguas continentales distan de ser equivalentes en sus relaciones iónicas de las aguas oceánicas. En la Figuras 31 se presentan de manera esquemática la comparación, en lo que se refiere a la composición iónica, de las aguas de los diferentes lagos cráter con las aguas oceánicas.

Los datos de concentración iónica de las aguas oceánicas o aguas de mar se tomaron de los autores (De la lanza y García, 1995). En general los lagos que presentan una elevada concentración de cloro y sodio son Alchichica y Atexcac se asemejan al agua de mar.

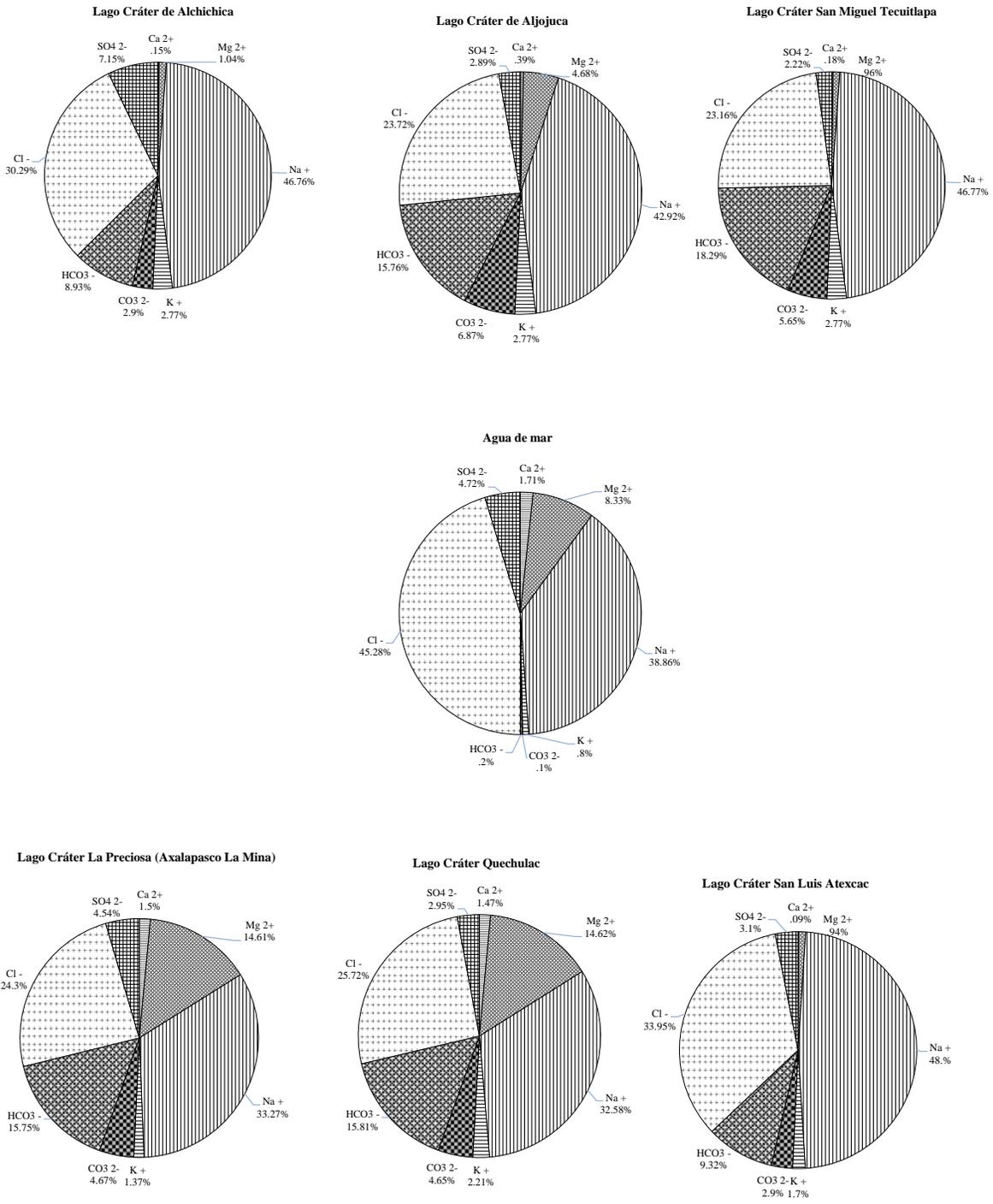


Figura 31. Concentración iónica en porcentaje de mmol_c L⁻¹ de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental.

5.3.5 Relación entre las conductividades eléctricas determinadas experimentalmente y las determinadas teóricamente

La concentración total de las sales solubles en las aguas de diferente origen, para propósitos de diagnóstico y de clasificación, se ha considerado que esta se puede expresar en términos de la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$.

Con el objetivo de establecer en qué medida las mediciones experimentales de la conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$) de las aguas de los lagos cráter corresponden con los valores teóricos de la conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$) de estas mismas aguas se procedió a establecer la relación funcional $CE_{\text{Teórica}} = fa CE_{\text{Experimental}}$. Para este efecto se calculó la conductividad eléctrica teórica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ para cada ion que se obtiene experimentalmente en las muestras de agua, de acuerdo con lo establecido por APHA. (1995). En la Figura 32, se presenta la relación funcional $CE_{\text{Teórica}} = fa CE_{\text{Experimental}}$.

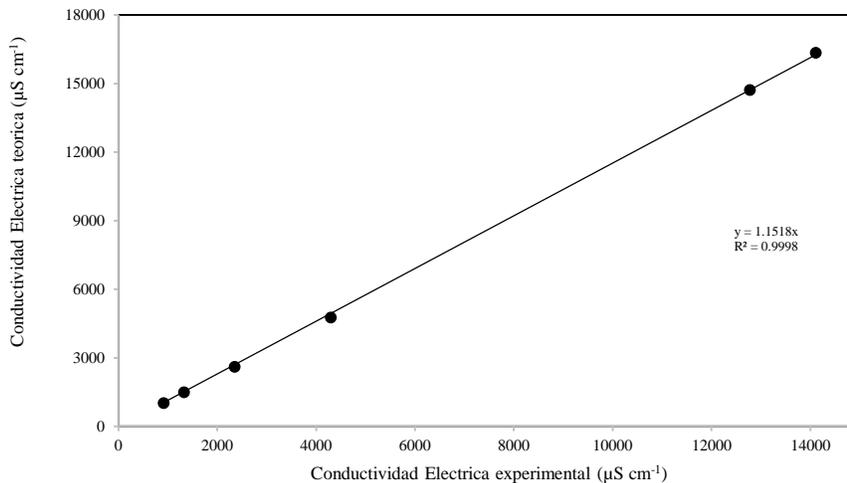


Figura 32. Relación funcional entre la conductividad eléctrica teórica y la experimental, en $\mu\text{S cm}^{-1}$, de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

5.3.6 Relación entre la concentración de sales (mg L^{-1}) y la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)

En la Figura 33, se presenta la relación funcional entre las concentraciones de las sales solubles de las aguas de los lagos cráter y sus valores correspondientes de la conductividad eléctrica: $\text{mg L}^{-1} = f(\text{CE})$. El valor de la pendiente encontrada es de 0.623, que corresponde a soluciones ricas en iones cloruro.

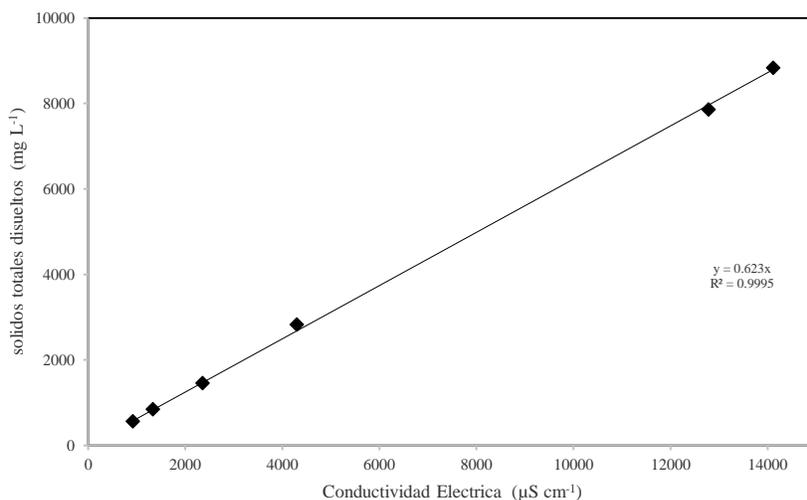


Figura 33. Concentración de sales expresadas en mg L^{-1} y su relación con la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

5.3.7 Relación de la suma de cationes y aniones (en mmolc L^{-1}) con la conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$)

Como se ha mencionado, una de las características que tienen las soluciones electrolíticas acuosas, es que su conductividad eléctrica expresada en $\mu\text{S cm}^{-1}$ está en función directamente proporcional a su concentración iónica.

Se presenta el valor de la relación funcional $\text{mmolc L}^{-1} = f(\text{CE})$, en la Figura 34 para los cationes de las aguas de los lagos cráter. El valor de la pendiente es de 0.0098, mientras que la Figura 35, para los aniones de las aguas de los lagos cráter su valor de la pendiente es de 0.0095.

Por lo que concluimos que los datos analíticos obtenidos son correctos.

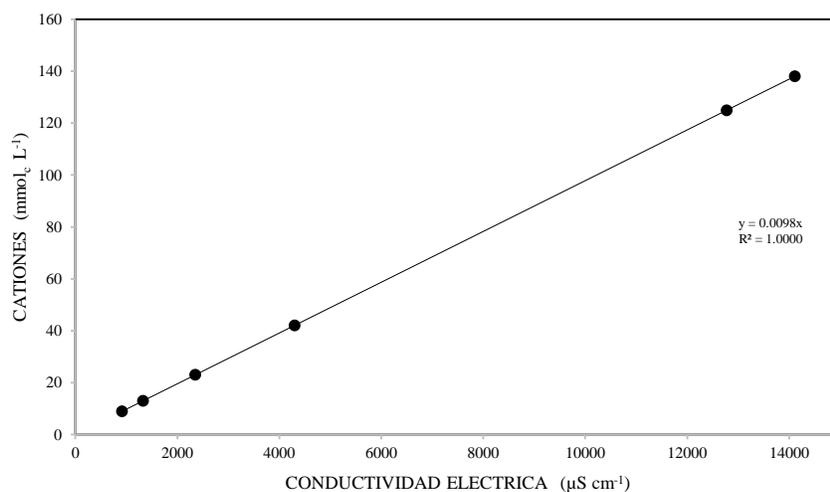


Figura 34. Relación de la suma de cationes en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ con la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

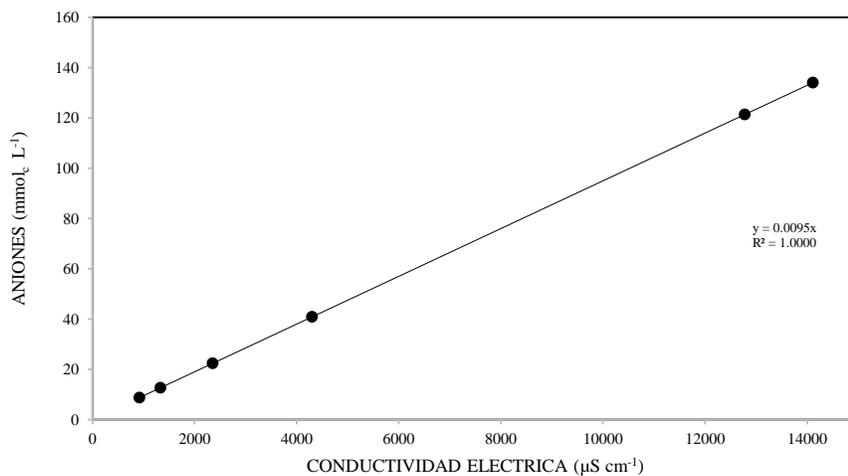


Figura 35. Relación de la suma de aniones en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ con la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Es necesario mencionar que las sales solubles que se encuentran en las soluciones acuosas de las aguas naturales superficiales y subterráneas, y de cuerpos de agua, en sus formas disociadas están formando diferentes iones independientes. Los fenómenos de disociación ocurren de acuerdo con las leyes de disociación electrolítica. Es así que los valores de la conductividad eléctrica de distintas soluciones salinas son proporcionales a las concentraciones iónicas de estas mismas soluciones.

5.3.9 Hidrogeoquímica

Por último, sólo se debe señalar que, las aguas que son geoquímicamente similares, se presentan agrupadas en áreas bien definidas (Custodio y Llamas, 1996).

En las Figuras 36, se presenta el diagrama.

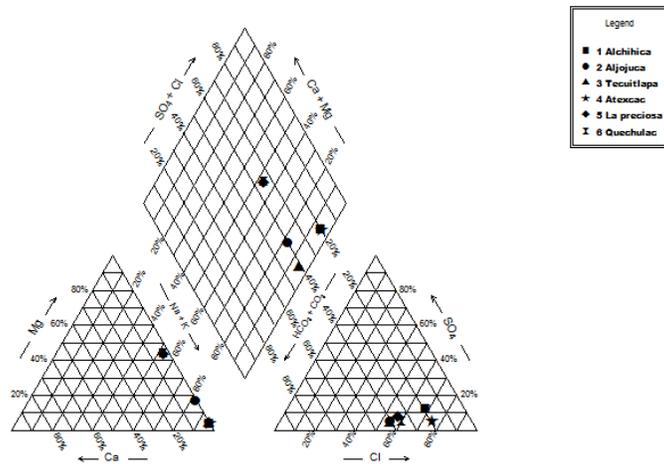


Figura 36. Clasificación hidrogeoquímica de las aguas de los lagos cráter.

VI. CONCLUSIONES

1. Las aguas superficiales de los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz, poseen cantidades prevalecientes de bicarbonato. La concentración de HCO_3 es de 0.32 a 8.89 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$.
2. Las aguas de Tlaxcala y mayormente de Puebla presentan concentraciones bajas y moderadas de bicarbonatos, que se deben al intemperismo de rocas sedimentarias y lutitas. De origen ígneo: tobas y espesores basálticos y riolíticos de regiones del Eje Neovolcánico.
3. Las concentraciones relativas y prevalecientes de iones de calcio y de bicarbonato en las aguas de Veracruz se deben al intemperismo de calizas.
4. Las aguas altamente salinas son de los lagos-cráter y de los manantiales de las Salinas de Zapotitlán, Puebla, son altamente sódicas. Pues las sales que prevalecen son: Cloruro de sodio (NaCl), sulfato de sodio (Na_2SO_4) y carbonato de sodio (Na_2CO_3).
5. Las aguas de los lagos-cráter de Alchichica ($14\ 115 \mu\text{S cm}^{-1}$), y de Atexcac ($12\ 780 \mu\text{S cm}^{-1}$), son de composición sulfático-clorhídrico-sódicas.
6. Los valores de Carbonato de Sodio Residual (CSR), en las aguas superficiales de Tlaxcala, Puebla y Veracruz es <0.0 . Esto significa que, en estas aguas se tienen suficientes cantidades de $\text{Ca} + \text{Mg}$ para neutralizar los $\text{CO}_3 + \text{HCO}_3$.
7. Las cantidades de fosfatos (PO_4) fueron de 0.0 a 2.84 mg L^{-1} ; de nitratos (NO_3) fue de 0.0 a 11.60 mg L^{-1} y los contenidos de boro fueron de 0.00 a 308.72 mg L^{-1} .
8. De acuerdo con la clasificación hidrogeoquímica, establecida por Piper, las aguas superficiales de Tlaxcala, Puebla y Veracruz de baja concentración son cálcico-bicarbonatadas. Y la zona de Zapotitlán salinas la gráfica geoquímica, de las muestras de agua es de variadas composiciones, permite delimitar aguas bicarbonatadas de baja concentración de aquellas aguas de alta concentración ricas en cloruros.
9. En las aguas de los manantiales de las Salinas de Zapotitlán, los contenidos de silicio (SiO_2), son altos: en Zapotitlán de 0.705 a 57.26 mg L^{-1} . Estos valores de SiO_2 se deben a pH altos de 9 a 10.

VII. RECOMENDACIONES

- a. Monitorear todas las fuentes de agua de estos estados de estudio: arroyos, pozos y manantiales; por lo que este monitoreo debe hacerse al menos dos veces al año.

- b. En cuanto a las corrientes superficiales el uso al riego es describir y analizar los componentes físico-químico-biológicos; iniciando en el origen de la fuente de agua y así evitar de su contaminación.

VIII. BIBLIOGRAFIA

- Ayers, R. S. y D. W., Westcot. 1987. La calidad del agua y su uso en la agricultura. Estudio FAO, Riego y Drenaje 29 Rev. 1. Trad. al español por J. F. Alfaro de: Water quality and use in agriculture. Roma, Italia. p. 1-81.
- Anderson, J. U., O. F. Bailey and H. E. Dregne. 1972. Short-term effects of irrigation with high sodium waters. Soil Sci. 113: 358-362.
- APHA. 1995. Standard methods for examination of water and wastewater. APHA (American Public Health Association), WWA (American Water Works Association), WPCF (Water Pollution Control Federation), Washington D.C., USA. 1035 pp.
- Arredondo, F.J., L. Borrego, R., Castillo y M. Valladolid. 1983. Batimetría y morfometría de los lagos "maars" de la Cuenca de Oriental, Puebla, México. Biótica: 8(1)31-47.
- Benson, S. W. 2007. Cálculos químicos. Una introducción al uso de las matemáticas en la química. Limusa. México. pp. 125-133.
- Bower, C. A. and Maasland. 1963. Sodium hazard of Punjab ground waters. West Pakistan Eng. Congr. Proc. 50: 49-61.
- Bower, C. A., G. Ogata and J. M. Tucker. 1968. Sodium Hazard of Irrigation waters as influenced by leaching fraction and by precipitation or solution of calcium carbonate. Soil Sci. 106(1):29-34.
- Castillo, L. F. 2003. El fenómeno mágico de la ósmosis. Tercera edición. La ciencia para todos No. 16. Fondo de Cultura Económica. México, DF. pp: 32-38.
- Carabias, J. 2005. Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México. Universidad Autónoma de México, Colegio de México y Fundación Gonzalo Río Arronte. México. 219 p

- Can, C. A. 2005. Evaluación de la Relación de Adsorción de Sodio en las aguas del cauce del Río Tulancingo, Estado de Hidalgo, México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 198 p.
- Chang, R. 2007. Química. Novena edición. McGraw Hill Interamericana. México, DF. pp: 169-219.
- CONAGUA. 2007. Estadísticas del agua en México, edición 2007. Comisión Nacional del Agua, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- CONAGUA. 2010. Sistema Nacional de Información del agua. Atlas digital del agua México 2010. www.conagua.gob.mx/atlas/ .
- Custodio, E. y R. Llamas. 1996. Hidrología subterránea. 2 tomos. Ed. Omega S.A., Barcelona España. 2350 p.
- Delgado, R. G. 2006. Agua: Usos y abusos: la hidroelectricidad en Mesoamérica. Publicado por UNAM, México. 201 p.
- De la lanza, E.G. y J.L. Garcia.1995. Lagos y presas de México. Centro de ecología y desarrollo. Compiladores. México D.F.320 pp.
- Doneen, L. O. 1958. Quality of water for irrigation. In: L. D. Doneen (ed). 1958. Proc. Conf. on Quality of Water for Irrigation No. 14. Water Resources Center. California, USA. 208 p.
- Doneen, L. D. 1975. Water quality for irrigated Agricultural. In: A. Poljakoff, Mayber A., and J. Gale (Eds.). Plant in saline environments. Springer-Verlang. New York. U.S.A.
- Eaton, F. M. 1950. Significance of carbonates in irrigation waters. Soil Sci. 69:123-133.
- Eaton, A. D., L. S. Clesceri and A. E. Greenberg. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th Edition. APHA, AWWA, WEF. Washington, USA. 1325 p.
- Figueruelo, A. J. y M. M. Dávila. 2004. Química física del ambiente y de los procesos medio ambientales. Editorial Reverté, S. A. España. 570 p.

Gil, R. M. 2005. Procesos de descontaminación de aguas. Editorial Thompson. Madrid España

INEGI, 2010. Regiones y cuencas hidrológicas [En línea]. Disponible en:

<http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/pue/rh.cfm?c=444&e=16>

INEGI. 2014. Consultada el 29 de mayo de 2014.

<http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/ver/agri.cfm?c=444&e=32>.

INEGI. 2014. Consultada el 29 de mayo de 2014.

<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/tlax/agri.cfm?c=444&e=29>.

INEGI.2014.Consultada el 29 de mayo de 2014.

<http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/pue/agri.cfm?c=444&e=26>.

Jurinak, J. J. and D. L. Suarez. 1990. The chemistry of salt-affected soils and waters. In: Tanji, K. K. Ed. Agricultural salinity assessment and management, Chapter 3. ASCE. Manuals and reports on engineering practice No. 71. New York, USA. pp:42-63

Kovda, V. A., C. Vanden Berg C. and R. M. Hogan. 1967. International source book on Irrigation and drainage of arid lands in relation to salinity and alkalinity. FAO/UNESCO.

Kovda, V. A., C. Vanden Berg y R. M. Hogan (eds.). 1973. Irrigation, drainage and salinity. An international source book FAO/UNESCO.HUTCHINSON/FAO/UNESCO. pp: 122-153.

Langelier, W. F. 1936. The analytical control of anticorrosion water treatment. J. American Waterworks Association 28: 1500-1521.

Lesser I., J. M. 1987. Hidrogeoquímica. *In*: UACH (ed.). Geohidrología. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Irrigación. Chapingo, México. pp. 127-170.

López, R. E. 1981. Geología de México. Tomo III 2ª Edición. UNAM. 446 p.

López, R. E. 1985. Geología de México. Tomo II 3ª Edición. UNAM. 454 p.

Martínez, A. P., P. Martínez, y C. Castaño. 2006. Fundamentos de hidrogeología. Ediciones Mundi-Prensa. España. 279 p.

- McNeal, B.L., and N.T. Coleman. 1966. Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30:308-312.
- McNeal, B. L., D. A. Layfield, W. A. Norvell and J. D. Rhoades. 1968. Factors influencing hydraulic conductivity of soils in presence of mixed-salt solutions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32: 187-190.
- Mendoza, S. I. 2009. Calidad de las aguas residuales urbano-industriales que riegan el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Morales, R. C.L. 1990. Hidrogeología de la Cuenca de Oriental estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz. Tesis de Licenciatura en Geología, UNAM. 130 p.
- Padilla, S. R.J. 2007. Evolución geológica del sureste Mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59(1):19-42.
- Piper, A. M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analysis. *Am. Geophys. Union Trans.* 25:914-923.
- Pizarro, F. 1985. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Segunda edición. Editorial Agrícola Española. Madrid, España.
- Ramírez M., O. M. 1988. Determinación experimental de la capacidad germinativa de algunos cultivos agrícolas en soluciones salinas de diferente concentración total y Chapingo, México. 217p
- Ramos, L. J., A. Cortés S., A. Ramírez G. y L. Barrón R. 2003a. Relaciones hidrogeoquímicas y sistemas de flujo entre las cuencas de México y Amacuzac. En: el recurso agua en el Alto Balsas, Oswald S., U. Editor. UNAM, Cuernavaca, Morelos, México.
- Ramos, O. R., R. Sepúlveda y F. Villalobos. 2003b. El agua en el medio ambiente: Muestreo y análisis. Plaza y Valdés Editores. Mexicali, Baja California. 210 p.

- Ramírez, G. J. 2009. Índices de salinidad de la red hidrográfica del estado de Morelos, México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. 241 p.
- Reyes C., M. 1979. Geología de la Cuenca de Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala. Colección Científica Prehistoria. SEP-INAH. México, DF. 62 p.
- Richards, L. A. 1973. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos: Manual No. 60. Sexta reimpresión. Departamento de Agricultura de los EE. UU., Laboratorio de Salinidad. Limusa. México. 172 p.
- Robarge, W. P., A. Edwards y B Jhonson. 1933. Water and waste water analysis for nitrate via nitration of salicylic acid. *Comm. Soil Sci. Plan Anal.* 14(12):1207-1215.
- Rodier J. 1978. Análisis de las aguas. Ediciones Omega. Barcelona, España. p:186-191.
- Szabolcs, I. 1989. Salt affected soils. CRS Press. Boca Raton, Florida, USA. 274 p.
- Seoáñez, C. M. 2005. Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo. Ediciones Mundi Prensa. España. 464 p.
- Suarez, D. L., 1981. Relation between pHc and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternative method of estimating SAR of soil or drainage waters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:469-475
- Thorne, D. W. and Peterson, H. B. 1949. Irrigated soils. Their fertility and management. The Blakiston Company. Philadelphia and Toronto, USA. p. 208.
- Tortolero, V. A. 2000. El agua y su historia, México y sus desafíos hacia el siglo XXI. Editores Siglo XXI. Madrid, España. 167 p.
- Valencia del T., G. y M. E. Garín A. 2007. Modelos fisicoquímicos. Solución de problemas. UNAM, FES-Iztacala. México. pp: 100-102.
- Velázquez M., M. A. 2001. Las variaciones de los procesos de adsorción de sodio en función de los diferentes valores de la relación de adsorción de sodio en las aguas residuales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan, Valle del Mezquital, Hgo. Tesis Doctora en Ciencias. Hidrociencias, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México. 116 p.
- VAPRO. 1995. User's manual. Wescor. USA. 99 p.

- Wetzel, R. 1981. Limnología. Ediciones Omega. Barcelona España. 666 p.
- Wilcox, L.V. 1948. The quality of water for irrigation use. US Department of Agriculture. Tech. Bulletin 962, 40 p.
- Wilcox, L. V., G. Y. Balir and C. A. Bower. 1954. Effect of bicarbonate on suitability of water for irrigation. Soil Sci. 77(4):259-266.
- Yáñez G., C. y S. García D. 1982. Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz. Comisión Federal de Electricidad. México, DF. 96 p.
- Zaporozec, A. 1972. Graphical interpretation of water-quality data. Ground Water 10(2):32-43.