



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS**

**AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS**

**COMPOSICIÓN IÓNICA DEL AGUA CON BASE AL  
USO DE SUELO Y VEGETACIÓN EN LA REGIÓN  
CENTRO-SURESTE DE MÉXICO**

JESÚS RUBÉN HERNÁNDEZ SÁNCHEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO**

2018



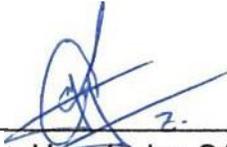
# COLEGIO DE POSTGRADUADOS

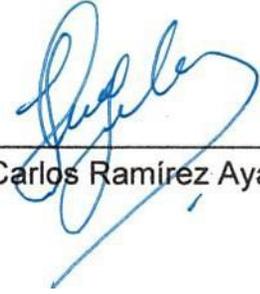
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS  
AGRÍCOLAS

## CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe, **Jesús Rubén Hernández Sánchez**, Alumno de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor **Dr. Carlos Ramírez Ayala**, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis "**COMPOSICIÓN IÓNICA DEL AGUA CON BASE AL USO DE SUELO Y VEGETACIÓN EN LA REGIÓN CENTRO-SURESTE DE MÉXICO**", y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillos, Texcoco, Edo. de México, a 29 de junio de 2018

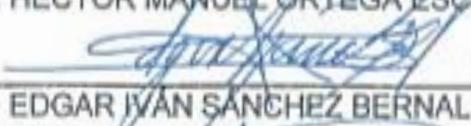
  
Al. **Jesús Rubén Hernández Sánchez**

  
Vo. Bo. Dr. **Carlos Ramírez Ayala**

La presente tesis titulada: ***Composición iónica del agua con base al uso de suelo y vegetación en la región centro-sureste de México.*** Realizada por el alumno Jesús Rubén Hernández Sánchez bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS  
HIDROCIENCIAS

**CONSEJO PARTICULAR**

CONSEJERO	 _____
	DR. CARLOS RAMÍREZ AYALA
ASESOR	 _____
	DR. HECTOR MANUEL ORTEGA ESCOBAR
ASESOR	 _____
	DR. EDGAR IVÁN SANCHEZ BERNAL
ASESOR	 _____
	DR. ALVARO CAN CHULIM

Montecillo, Texcoco, Estado de México, julio de 2018

# COMPOSICIÓN IÓNICA DEL AGUA CON BASE AL USO DE SUELO Y VEGETACIÓN EN LA REGIÓN CENTRO-SURESTE DE MÉXICO.

Jesús Rubén Hernández Sánchez, M. en C.

Colegio De Postgraduados, 2018

## RESUMEN

El agua muestreada en la región centro-sureste de México conformada por los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz, es de uso agrícola en la mayoría de los casos. Para esta investigación se obtuvieron un total de 97 muestras, divididas en siete diferentes usos de suelo y vegetación; 27 clasificadas de uso agrícola, cuatro muestras de uso bosque, seis muestras en lagos cráter, 47 muestras de diversas Salinas, cuatro muestras en pastizal, tres muestras en uso urbano y seis muestras en vegetación secundaria, con la finalidad de conocer sus características fisicoquímicas mediante una investigación de tipo observacional, prospectiva, transversal, descriptiva y científica. Se logró conocer las diferentes variaciones en la composición iónica de las muestras y las concentraciones electrolíticas de las aguas. Las determinaciones fisicoquímicas fueron: temperatura, pH, CE, determinación de iones:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , B,  $\text{P-PO}_4^{3-}$  y  $\text{N-NO}_3^-$ , y sólidos totales disueltos. A través de estas determinaciones, se clasificaron las aguas de manera cualitativa y cuantitativa, con base en los tipos de sales disueltas y su cantidad. La mayoría de aguas son bicarbonatadas-cálcicas-magnésicas, presentando concentraciones iónicas bajas y medias, recomendables para su uso agrícola, solo las muestras clasificadas como “Las Salinas” y los “Lagos Cráter” son aguas cloradas-sódicas, no aptas para uso agrícola. La clasificación con base en el uso de suelo y vegetación que predomina sobre microcuencas donde se colectaron las muestras de agua nos ayuda a generar una posible idea sobre el uso del agua en la agricultura, siempre y cuando el agua no sea de origen subterránea.

Palabras Clave: Calidad del agua, uso agrícola, uso de suelo y vegetación, sales.

# IONIC COMPOSITION OF WATER WITH BASE ON THE USE OF SOIL AND VEGETATION IN THE CENTRAL-SOUTHEAST REGION OF MEXICO.

Jesús Rubén Hernández Sánchez, M. en C.

Colegio De Postgraduados, 2018

## **ABSTRACT**

The sampled water in the central-southeast region of Mexico, conformed of the states of Tlaxcala, Puebla and Veracruz, is for agricultural use in most cases. For this investigation, a total of 97 samples were obtained, divided into seven different soil and vegetation uses; 27 classified use as agricultural, four samples in forest, six samples in lakes, 47 samples in diverse salinas, four samples in grasslands, three samples in urban and six samples in secondary vegetation, with the purpose of knowing their physicochemical characteristics through an observational research, prospective, transversal, descriptive and scientific. Was achieved to know the different variations {in the ionic composition of the samples and the electrolytic concentrations of the waters. The physicochemical determinations were: temperature, pH, EC, ion determination:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , B, P- $\text{PO}_4^{3-}$  and N- $\text{NO}_3^-$ , and total dissolved solids. Through these determinations, water was classified qualitatively and quantitatively, based on the types of dissolved salts and their quantity. The majority of the waters are bicarbonated-calcium-magnesium, low and medium ionic concentrations, recommended for agricultural use, only the samples classified as "Las Salinas" and "Crater Lakes" are waters with chlorinated-sodium, not suitable for agricultural use. The classification based on the use of soil and the vegetation that predominates over the micro-basins, where the water samples were collected, we help generate a possible idea about the use of water in agriculture, as long as the water is not of origin underground.

Keywords: Water quality, agricultural use, use of soil and vegetation, salts

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Colegio de Postgraduados, por brindarme los conocimientos y habilidades necesarias para el desarrollo de mi formación profesional.

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

Al Dr. Carlos Ramírez Ayala sembrador del conocimiento, por su apoyo y confianza, y capacidad profesional para guiar la presente investigación haciendo aportes invaluable, no solamente en el desarrollo de esta tesis, sino también en mi formación como investigador.

Al Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar, por ser un investigador comprometido con la ciencia. Debo destacar su disponibilidad y aporte en los muestreos, y el desarrollo de la tesis, mediante su experiencia y conocimientos que enriquece el presente trabajo.

Al Dr. Edgar Iván Sánchez Bernal, por las revisiones meticulosas y recomendaciones de la presente investigación. Le agradezco también, las críticas constructivas que redundaran benéficamente tanto a nivel científico como personal.

Al Dr. Álvaro Can Chulim, por su atenta y oportuna colaboración durante el desarrollo de la presente investigación. Le agradezco también, los conocimientos y experiencias aportadas de tipo profesional que son la base de la presente investigación.

Al Sr. Rey David Barragán Huerta, por ser nuestro amigo y guía en la toma de muestras en las Salinas, Zapotitlán Puebla. Hizo posible esta investigación con el aporte de sus conocimientos y la autorización para ingresar a los diferentes nacimientos de la zona.

A la Sra. María de Jesús Hernández Fragoso y al Sr. J. Santos de la Cruz Frutero, por su apoyo brindado en el laboratorio de Ciencias Ambientales de Hidrociencias.

A la Sra. Elvia Amalia Sosa Galán, por su gran apoyo en todo tipo de trámites durante mi etapa de estudiante.

A mis padres Patricia Sánchez Fuentes y Pedro Hernández Salazar, por creer en mí y darme siempre su apoyo incondicional en todas mis decisiones. Por sus consejos he alcanzado mis metas con gran orgullo, les debo un eterno agradecimiento.

A mis hermanos la QFB. Nancy Karina y el Ing. Pedro Javier, por ser una fuente de inspiración y pregonar con el ejemplo de que los sueños se vuelven realidad.

## CONTENIDO

	Página
RESUMEN .....	iv
ABSTRACT .....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
LISTA DE CUADROS .....	xiii
LISTA DE FIGURAS .....	xvi
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	3
2.1 OBJETIVOS.....	3
2.1.1 General .....	3
2.1.2 Específicos.....	3
2.2 HIPÓTESIS .....	3
3 REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
3.1 El agua y su distribución en el planeta.....	4
3.2 Las propiedades del agua, una sustancia única.....	4
3.3 El agua como un disolvente universal.....	5
3.4 Factores antropogénicos y naturales que determinan la composición química del agua ..	6
3.5 Influencia de factores antropogénicos en la composición del agua.....	7
3.5.1 Agricultura.....	7
3.5.2 Ganadería.....	8
3.6 Influencia de los factores naturales en la composición del agua .....	9
3.6.1 Temperatura.....	10
3.6.2 Vegetación forestal .....	10
3.7 Origen de las sales y sus procesos de acumulación en aguas naturales .....	11

3.7.1	Ciclos de acumulación de sales .....	12
3.7.2	Solubilidad de las sales en el agua natural .....	14
3.8	Iones mayoritarios, minoritarios y trazas, presentes en aguas Naturales .....	16
3.8.1	Cationes y sustancias catiónicas. ....	16
3.8.2	Aniones y sustancias aniónicas.....	18
3.9	Calidad del Agua .....	20
3.10	El agua para uso agrícola .....	21
3.11	Calidad de las aguas para riego .....	22
3.11.1	Índice de Carbonato de Sodio Residual (CSR) .....	22
3.11.2	Índice de salinidad .....	24
3.11.3	Índice de Salinidad Efectiva (SE).....	24
3.11.4	Índice de Salinidad Potencial (SP).....	25
3.12	Peligro de salinidad (CE).....	26
3.13	Peligro de Sodicidad (RAS).....	27
3.13.1	Ecuación para el cálculo de la relación de adsorción de sodio original.....	27
3.13.2	Ecuación para el cálculo de la relación de adsorción de sodio ajustada.....	28
3.13.3	Ecuación para el cálculo de la relación de adsorción de sodio corregida .....	30
3.14	Clasificación de aguas con base en el RAS .....	32
3.14.1	Ecuación para el cálculo del porcentaje de sodio intercambiable .....	35
3.15	Evaluación de los problemas de infiltración del agua para riego en el suelo .....	37
3.16	Clasificación hidrogeoquímica del agua.....	39
3.17	Índices de toxicidad.....	40
4	MATERIALES Y MÉTODOS .....	41
4.1	Zona de estudio .....	41
4.1.1	Ubicación General .....	41

4.1.2	Descripción General de las Microcuencas .....	44
4.2	Muestreo.....	50
4.3	Análisis de agua .....	56
4.4	Comprobación de resultados de los análisis físico-químicos de aguas.....	56
4.4.1	Balance de cationes y aniones .....	56
4.4.2	Conductividad eléctrica.....	57
4.4.3	Sólidos totales disueltos .....	57
4.4.4	Conductividad eléctrica y la suma de iones .....	57
4.4.5	Sólidos totales disueltos medidos a un rango de conductividad eléctrica.....	58
4.4.6	Análisis estadístico.....	58
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	60
5.1	Concentración iónica de las muestras .....	60
5.1.1	Clasificación Agrícola.....	60
5.1.2	Clasificación Bosque.....	66
5.1.3	Clasificación Lagos Cráter .....	67
5.1.4	Clasificación las Salinas.....	69
5.1.5	Clasificación Pastizal .....	77
5.1.6	Clasificación urbana.....	79
5.1.7	Clasificación vegetación secundaria .....	80
5.2	Relación entre la conductividad eléctrica teórica y la experimental .....	82
5.2.1	Clasificación agrícola.....	83
5.2.2	Clasificación bosque .....	83
5.2.3	Clasificación Lagos cráter.....	84
5.2.4	Clasificación Las Salinas .....	84
5.2.5	Clasificación Pastizal .....	85

5.2.6	Clasificación Urbano.....	85
5.2.7	Clasificación Vegetación Secundaria.....	86
5.3	Relación entre la suma de cationes y aniones ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ), con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ).	86
5.3.1	Clasificación agrícola.....	87
5.3.2	Clasificación bosque. ....	88
5.3.3	Clasificación Lagos Cráter. ....	89
5.3.4	Clasificación Las Salinas. ....	90
5.3.5	Clasificación Pastizal. ....	91
5.3.6	Clasificación Urbano.....	92
5.3.7	Clasificación Vegetación secundaria. ....	93
5.4	Relación entre la concentración de sales ( $\text{mg L}^{-1}$ ) y CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) .....	94
5.4.1	Clasificación Agrícola.....	94
5.4.2	Clasificación Bosque.....	95
5.4.3	Clasificación Lagos Cráter .....	95
5.4.4	Clasificación Las Salinas .....	96
5.4.5	Clasificación Pastizal .....	96
5.4.6	Clasificación Urbano.....	97
5.4.7	Clasificación Vegetación secundaria .....	98
5.5	Distribución de cationes y aniones .....	98
5.5.1	Clasificación Agrícola.....	98
5.5.2	Clasificación Bosque.....	99
5.5.3	Clasificación Lagos Cráter .....	100
5.5.4	Clasificación Las Salinas .....	100
5.5.5	Clasificación Pastizal .....	101

5.5.6	Clasificación Urbano.....	102
5.5.7	Clasificación Vegetación Secundaria.....	102
5.6	Relaciones iónicas de las aguas .....	103
5.7	Índice de salinidad efectiva .....	104
5.7.1	Clasificación Agrícola.....	105
5.7.2	Clasificación Bosque.....	105
5.7.3	Lagos Cráter .....	106
5.7.4	Clasificación Las Salinas .....	106
5.7.5	Clasificación Pastizal .....	107
5.7.6	Clasificación Urbano.....	107
5.7.7	Clasificación Vegetación Secundaria.....	107
5.8	Relación de Índice de Salinidad Potencial .....	108
5.8.1	Clasificación Agrícola.....	108
5.8.2	Clasificación Bosque.....	109
5.8.3	Clasificación Lagos Cráter .....	109
5.8.4	Clasificación Las Salinas .....	109
5.8.5	Clasificación Pastizal .....	110
5.8.6	Clasificación Urbano.....	110
5.8.7	Clasificación Vegetación Secundaria.....	111
5.9	Síntesis de clasificación de las aguas con base en su relación de adsorción de sodio (RAS) en sus tres conceptualizaciones.....	112
5.9.1	Clasificación Agrícola.....	112
5.9.2	Clasificación Bosque.....	114
5.9.3	Clasificación Lagos cráter.....	115
5.9.4	Clasificación Pastizal .....	116

5.9.5	Clasificación Urbano.....	117
5.9.6	Clasificación Vegetación Secundaria.....	118
5.10	Clasificación Hidrogeoquímica de las aguas. ....	119
5.10.1	Clasificación las Salinas.....	119
5.10.2	Clasificación Lagos cráter.....	120
5.11	Contenido de boro, fósforo y nitrógeno en las aguas .....	121
5.11.1	Contenido de boro.....	121
5.11.2	Contenido de Fosforo en aguas .....	126
5.11.3	Contenido de nitrógeno en aguas.....	130
6	CONCLUSIONES .....	134
7	RECOMENDACIONES.....	137
8	LITERATURA CITADA .....	138

## LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 3-1. Propiedades del agua .....	5
Cuadro 3-2. Comparativa de la composición química de agua en terrenos forestales.....	11
Cuadro 3-3. Composición de la corteza terrestre.....	12
Cuadro 3-4. Clasificación de las aguas para riego con base en el índice de carbonato de sodio residual (CSR) .....	23
Cuadro 3-5. Clasificación del agua de riego según la CE. ....	24
Cuadro 3-6. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo al índice de salinidad efectiva (SE). .....	25
Cuadro 3-7. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo al índice de salinidad Potencial (SP) y algunos parámetros del suelo .....	25
Cuadro 3-8. Concentración de $\text{Ca}^{\circ}$ 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 <sup>1,2,3</sup> .....	31
Cuadro 4-1. Microcuencas muestreadas del estado de Puebla .....	41
Cuadro 4-2. Microcuencas muestreadas en el estado de Tlaxcala.....	42
Cuadro 4-3. Microcuencas muestreadas del estado de Veracruz .....	43
Cuadro 4-4. Caracterización de las microcuencas en Puebla .....	45
Cuadro 4-5. Caracterización de las microcuencas en Tlaxcala .....	47
Cuadro 4-6. Caracterización de las microcuencas en Veracruz .....	48
Cuadro 4-7. Clasificación agrícola .....	50
Cuadro 4-8. Clasificación bosque mesófilo de montaña.....	51
Cuadro 4-9. Clasificación lagos cráter .....	52
Cuadro 4-10. Clasificación Las Salinas .....	52
Cuadro 4-11. Clasificación pastizal .....	54
Cuadro 4-12. Clasificación zona urbana .....	54
Cuadro 4-13. Clasificación selva baja.....	54
Cuadro 4-14 Métodos analíticos empleados en la determinación físico-química de aguas.....	56
Cuadro 4-15. Criterios de aceptación del balance anión-catión. ....	57

Cuadro 5-1. Concentración iónica de 27 sitios de muestreos clasificadas en uso de suelo y vegetación agrícola. ....	61
Cuadro 5-2. Concentración iónica de 4 sitios de muestreos clasificadas en uso de suelo y vegetación bosque. ....	66
Cuadro 5-3. Concentración iónica de 6 sitios de muestreos clasificadas como Lagos Cráter .....	67
Cuadro 5-4 Concentración iónica de 47 sitios de muestreos clasificadas como Las Salinas .....	69
Cuadro 5-5 Concentración iónica de cuatro sitios de muestreos clasificadas como pastizal .....	77
Cuadro 5-6. Concentración iónica de tres sitios de muestreos clasificadas como urbano .....	79
Cuadro 5-7. Concentración iónica de seis sitios de muestreos clasificadas vegetación secundaria .....	80
Cuadro 5-8. Clasificación de muestras por tipo de salinización. ....	104
Cuadro 5-9. Clasificación de las aguas con base en su salinidad efectiva. Clasificación agrícola .....	105
Cuadro 5-10. Clasificación de las aguas con base en su salinidad efectiva. Clasificación bosque .....	105
Cuadro 5-11. Clasificación de las aguas con base en su salinidad efectiva. Clasificación Lagos Cráter.....	106
Cuadro 5-12. Clasificación de las aguas con base en su salinidad efectiva. Clasificación Las Salinas .....	106
Cuadro 5-13. Clasificación de las aguas con base en su salinidad efectiva. Clasificación Pastizal .....	107
Cuadro 5-14. Clasificación de las aguas con base en su salinidad efectiva. Clasificación Urbano .....	107
Cuadro 5-15. Clasificación de las aguas con base en su salinidad efectiva. Clasificación Vegetación secundaria.....	108
Cuadro 5-16. Clasificación de las aguas con base en su salinidad potencial. Clasificación Agrícola .....	108
Cuadro 5-17. Clasificación de las aguas con base en su salinidad potencial. Clasificación Bosque .....	109
Cuadro 5-18. Clasificación de las aguas con base en su salinidad potencial. Clasificación Lagos Cráter.....	109

Cuadro 5-19. Clasificación de las aguas con base en su salinidad potencial. Clasificación Las Salinas .....	109
Cuadro 5-20. Clasificación de las aguas con base en su salinidad potencial. Clasificación Pastizal .....	110
Cuadro 5-21. Clasificación de las aguas con base en su salinidad potencial. Clasificación Urbano .....	111
Cuadro 5-22. Clasificación de las aguas con base en su salinidad potencial. Clasificación Vegetación secundaria .....	111
Cuadro 5-23. Valores de los tres tipos de RAS por muestra. Clasificación agrícola .....	112
Cuadro 5-24. Valores de los tres tipos de RAS por muestra. Clasificación bosque .....	114
Cuadro 5-25. Valores de los tres tipos de RAS por muestra. Clasificación Lagos Cráter .....	115
Cuadro 5-26. Valores de los tres tipos de RAS por muestra. Clasificación Pastizal .....	116
Cuadro 5-27. Valores de los tres tipos de RAS por muestra. Clasificación Urbano .....	117
Cuadro 5-28. Valores de los tres tipos de RAS por muestra. Clasificación Secundaria.....	118

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 3-1. Solubilidad de las sales con respecto a la temperatura .....	15
Figura 3-2. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego agrícola .....	34
Figura 3-3. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio.....	38
Figura 3-4. Sistema de clasificación hidrogeoquímica de aguas naturales usando el diagrama trilíneal de Piper.....	39
Figura 4-1. Localización espacial de las Microcuencas muestreadas del estado de Puebla. ....	42
Figura 4-2. Localización espacial de las Microcuencas muestreadas del estado de Tlaxcala. ....	43
Figura 4-3. Localización y distribución espacial de las Microcuencas muestreadas del estado de Veracruz. ....	44
Figura 4-4. Distribución espacial des 97 muestras colectadas clasificadas con base en el uso de suelo y vegetación.....	55
Figura 5-1. Relación de CE teórica y experimental para la clasificación de uso de suelo agrícola .....	83
Figura 5-2. Relación de CE teórica y experimental para la clasificación de uso de suelo bosque	83
Figura 5-3. Relación de CE entre teórica y experimental para la clasificación de uso de suelo Lagos cráter.....	84
Figura 5-4. Relación de CE entre teórica y experimental para la clasificación de uso de suelo Las Salinas .....	84
Figura 5-5. Relación de CE entre teórica y experimental para la clasificación de uso de suelo Pastizal .....	85
Figura 5-6. Relación de CE entre teórica y experimental para la clasificación de uso de suelo Urbano.....	85
Figura 5-7. Relación de CE entre teórica y experimental para la clasificación de uso de suelo vegetación secundaria. ....	86
Figura 5-8. Relación entre concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Clasificación agrícola.....	87
Figura 5-9. Relación entre concentración de aniones ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Clasificación agrícola.....	87

Figura 5-10. Relación entre concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). 1). Clasificación bosque.....	88
Figura 5-11. Relación entre concentración de aniones ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Clasificación bosque. ....	88
Figura 5-12. Relación entre concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). 1). Clasificación Lagos Cráter.....	89
Figura 5-13. Relación entre la concentración de aniones ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). 1). Clasificación Lagos Cráter.....	89
Figura 5-14. Relación entre concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). 1). Clasificación Las Salinas .....	90
Figura 5-15. Relación entre concentración de aniones ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Clasificación Las Salinas .....	90
Figura 5-16. Relación entre concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). 1). Clasificación Pastizal.....	91
Figura 5-17. Relación entre concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). 1). Clasificación pastizal .....	91
Figura 5-18. Relación entre concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). 1). Clasificación urbano .....	92
Figura 5-19. Relación entre concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). 1). Clasificación urbano .....	92
Figura 5-20. Relación entre concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). 1). Clasificación vegetación secundaria.....	93
Figura 5-21. Relación entre concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). 1). Clasificación vegetación secundaria.....	93
Figura 5-22. Relación entre la concentración de sales y la CE. Clasificación agrícola .....	94
Figura 5-23. Relación entre la concentración de sales y la CE. Clasificación bosque .....	95
Figura 5-24. Relación entre la concentración de sales y la CE. Clasificación Lagos Cráter .....	95
Figura 5-25. Relación entre la concentración de sales y la CE. Clasificación Las Salinas.....	96
Figura 5-26. Relación entre la concentración de sales y la CE. Clasificación Pastizal. ....	97
Figura 5-27. Relación entre la concentración de sales y la CE. Clasificación Urbano.....	97

Figura 5-28. Relación entre la concentración de sales y la CE. Clasificación Vegetación secundaria.....	98
Figura 5-29. Distribución de iones en agua, clasificación agrícola .....	99
Figura 5-30. Distribución de iones en agua, clasificación bosque.....	99
Figura 5-31. Distribución de iones en agua, clasificación Lagos Cráter.....	100
Figura 5-32. Distribución de iones en agua, clasificación Las Salinas .....	101
Figura 5-33. Distribución de iones en agua, clasificación Pastizal.....	101
Figura 5-34. Distribución de iones en agua, clasificación Pastizal.....	102
Figura 5-35. Distribución de iones en agua, clasificación Vegetación Secundaria .....	103
Figura 5-36. Figura 44. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego. Clasificación agrícola.....	113
Figura 5-37. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego. Clasificación bosque.....	114
Figura 5-38. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego. Clasificación Lagos Cráter .....	115
Figura 5-39. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego. Clasificación Pastizal.....	116
Figura 5-40. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego. Clasificación Urbano .....	117
Figura 5-41. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego. Clasificación Vegetación secundaria.....	118
Figura 5-42. clasificación hidrogeoquímica de las aguas Las Salinas .....	119
Figura 5-43. Clasificación hidrogeoquímica de las aguas Lagos Cráter.....	120
Figura 5-44. Concentración de boro ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación agrícola...	122
Figura 5-45. Concentración de boro ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación bosque ....	122
Figura 5-46. Concentración de boro ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Lagos Cráter .....	123
Figura 5-47. Concentración de boro ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Las Salinas .....	123
Figura 5-48. Concentración de boro ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Pastizal ...	124
Figura 5-49. Concentración de boro ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Urbano ...	124
Figura 5-50. Concentración de boro ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Vegetación secundaria.....	125

Figura 5-51. Concentración de fosforo de los fosfatos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Agrícola.....	126
Figura 5-52. Concentración de fosforo de los fosfatos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Bosque.....	127
Figura 5-53. Concentración de fosforo de los fosfatos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Lagos Cráter .....	127
Figura 5-54. Concentración de fosforo de los fosfatos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Las Salinas .....	128
Figura 5-55. Concentración de fosforo de los fosfatos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Pastizal .....	128
Figura 5-56. Concentración de fosforo de los fosfatos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Urbano.....	129
Figura 5-57. Concentración de fosforo de los fosfatos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Vegetación secundaria .....	129
Figura 5-58. Concentración de nitrógeno de los nitratos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Agrícola.....	130
Figura 5-59. Concentración de nitrógeno de los nitratos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Bosque.....	131
Figura 5-60. Concentración de nitrógeno de los nitratos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Lagos Cráter .....	131
Figura 5-61. Concentración de nitrógeno de los nitratos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Las Salinas .....	132
Figura 5-62. Concentración de nitrógeno de los nitratos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Pastizal .....	132
Figura 5-63. Concentración de nitrógeno de los nitratos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Urbano.....	133
Figura 5-64. Concentración de nitrógeno de los nitratos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Vegetación secundaria .....	133

## **1 INTRODUCCIÓN**

Se estima que, en 1950 la población mundial ascendía a 2,532 millones de personas, mientras que para 2015 habrá aumentado a 7,325 millones. A partir de los últimos sesenta años, el crecimiento se ha concentrado principalmente en las regiones en desarrollo, tendencia que se mantendrá al 2050. Se estima que para 2050 la población mundial será de 9,306 millones y con ello la producción agrícola global en 2050 necesitará aumentar en al menos un 60 por ciento respecto a 2006, una tasa de crecimiento de al menos 1.2 por ciento anual (ONU-DAES 2014).

Las dinámicas de la población y un estándar de vida mundial cada vez más exigente están impulsando la producción y el consumo de bienes y servicios para satisfacer las necesidades cada vez mayores de una población creciente y más solvente económicamente. El mercado exige productos que consumen mucha agua, tales como la carne, y ésta demanda tiende a crecer con el desarrollo económico, aumentando así drásticamente la demanda de agua en la agricultura. (WWDR 2016).

En México, la distribución geográfica del agua no coincide con la distribución geográfica de la población, mismas que se encuentran íntimamente ligadas a satisfacer las necesidades básicas de la población, 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 (SEMARNAT/CONAGUA 2011).

En México, el sector que más agua desperdicia es el que más la consume: el sector agropecuario (agricultura y ganadería). Las estimaciones de la Comisión Nacional del Agua mencionan que 57% del agua que consume se pierde por evaporación, pero, sobre todo, por infraestructura de riego ineficiente, en mal estado u obsoleta. La superficie irrigada es de 6.3 millones de hectáreas y aporta el 42% de la producción agrícola nacional. Las pérdidas por infiltración y evaporación ascienden a más de 60% del agua almacenada y distribuida para fines agrícolas (CONAGUA 2015).

Para determinar el uso posible del agua para riego agrícola, se deberán considerar los siguientes factores: a) Su composición química, b) Particularidades de los cultivos agrícolas, c) Clima de la zona agrícola bajo riego, d) Propiedades físico-químicas de los suelos bajo riego, y e) Métodos

agronómicos que se utilizan en la explotación de los diferentes cultivos agrícolas (Oster y Rhoades, 1989).

La calidad de agua para riego agrícola puede variar significativamente según el tipo y calidad de sales disueltas. Las sales disueltas se encuentran en concentraciones relativamente pequeñas pero significativas, y por lo general tienen su origen en la disolución e intemperización de rocas de la corteza terrestre, además de la disolución lenta de calizas, de yeso y de otros minerales (Bernsteins y Francois, 1973).

El agua en la agricultura es esencial para la producción exitosa de cultivos y su calidad dependerá de la fuente de origen abastecedora, encontrándose en la superficie o de forma subterránea, es por ello que para éste estudio se realizó un análisis descriptivo sobre la composición físico-química de diferentes aguas subterráneas y superficiales, con la finalidad de evaluar su posible uso o restricción en la agricultura. El objetivo de la presente investigación es dar a conocer la composición y el tipo de agua existente en la región centro-sureste de México mediante la clasificación con base en los usos de suelo y vegetación.

Las principales determinaciones fueron: potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD), cationes;  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y aniones;  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , con éstas determinaciones, se obtuvieron diferentes índices de salinidad y sodicidad, y se clasificó el agua con base en los criterios agronómicos mediante CE y la relación adsorción de sodio en sus diferentes conceptualizaciones ( $\text{RAS}$ ,  $\text{RAS}_{\text{aj}}$  y  $\text{RAS}^\circ$ ), con la finalidad de conocer el índice que incide en las propiedades físicas del suelo. Además, se analizó el contenido de boro, fosforo de los fosfatos y nitrógeno de los nitratos, con la finalidad de conocer el grado de perturbación en las aguas naturales.

## **2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

### **2.1 OBJETIVOS**

#### **2.1.1 General**

Con la finalidad de conocer el uso potencial de las aguas superficiales y subterráneas para uso agrícola presentes en la región centro-sureste de México clasificadas con base en el uso de suelo y vegetación, se determinaron las características físico-químicas y diversos parámetros a cada una de ellas.

#### **2.1.2 Específicos**

- Determinar los principales iones que describen las características físico-químicas de las aguas:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , B, P- $\text{PO}_4^{3-}$ , N- $\text{NO}_3^-$  y las variables: pH, CE, y sólidos totales disueltos (STD).
- Explicar las relaciones existentes en la composición iónica.
- Determinar los valores de Relación de Adsorción de Sodio con sus diferentes conceptualizaciones ( $\text{RAS}_{\text{original}}$ ,  $\text{RAS}_{\text{ajustada}}$  y  $\text{RAS}^{\circ}_{\text{corregida}}$ )
- Obtener los diferentes índices de salinidad, salinidad efectiva y salinidad potencial
- Describir las características geoquímicas e hidrogeoquímicas de las aguas.
- Determinar el tipo de agua y su posible uso para la agricultura en la región centro-sureste de México, clasificadas mediante al uso de suelo y vegetación con la que se encuentran interactuando.

### **2.2 HIPÓTESIS**

Con base en las diferentes variables físico-químicas de las aguas superficiales y subterráneas de la región centro-sureste de México y la asociación de variables específicas, se puede inferir sobre los niveles de sodio intercambiable en suelos y proponer su posible uso en la agricultura.

### **3 REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **3.1 El agua y su distribución en el planeta**

El agua, con una fórmula química engañosamente simple de H<sub>2</sub>O, es una sustancia de vital importancia en todas las partes del medioambiente. El agua cubre aproximadamente el 70% de la superficie de la Tierra. Ocurre en todas las partes del medio ambiente; en los océanos se encuentra como un vasto depósito de agua salada, en tierra como aguas superficiales formando lagos y ríos, y en el subsuelo como aguas subterráneas, en la atmósfera como vapor de agua, en capas polares como hielo sólido, y en muchos segmentos de la antroposfera, como en calderas o sistemas municipales de distribución de agua (Manahan 2000).

El agua es la fuente y el sustento de la vida, contribuye a regular el clima del mundo y con su fuerza formidable modela la Tierra. Posee propiedades únicas que la hacen esencial para la vida. Es un material flexible: un solvente extraordinario, un reactivo ideal en muchos procesos metabólicos; tiene una gran capacidad calorífica y tiene la propiedad de expandirse cuando se congela. Con su movimiento puede modelar el paisaje y afectar el clima (Fernández 2012).

Del 70% de agua que existe en el planeta, los océanos dan cuenta de casi el 97,5 % del agua total. Únicamente un 2,5% es agua dulce. Los glaciares, la nieve y el hielo de los cascos polares representan casi el 80% del agua dulce, el agua subterránea 19% y el agua de superficie accesible rápidamente sólo el 1%. Esta baja cantidad de agua de superficie fácilmente accesible, se encuentra principalmente en lagos (52%) y humedales (38%) (Fernández 2012).

#### **3.2 Las propiedades del agua, una sustancia única**

El agua tiene una serie de propiedades únicas que son esenciales para la vida. Algunas de las características especiales del agua incluyen su carácter polar, la tendencia a formar enlaces de hidrógeno y la capacidad de hidratar iones metálicos (Manahan 2000). En el Cuadro 3-1. Propiedades del agua, se pueden apreciar sus efectos y significados.

Cuadro 3-1. Propiedades del agua

Propiedades	Efectos y significados
Excelente solvente	Transporte de nutrientes y productos de desecho, con posibles procesos biológicos en un medio acuoso
La constante aislante más alta de cualquier líquido común	Alta solubilidad de sustancias iónicas y su ionización en solución
Mayor tensión superficial que cualquier otro líquido	Factor controlador en fisiología; gobierna los fenómenos de caída y superficie
Transparente a fracción visible y de longitud de onda más larga que la luz ultravioleta	Incoloro, lo que permite que la luz necesaria para que la fotosíntesis alcance profundidades considerables en cuerpos de agua
La densidad máxima se tiene como líquido a 4 °C	Flotadores de hielo; circulación vertical restringida en estratificado
Mayor calor de evaporación que cualquier otro material	Determina la transferencia de moléculas de calor y agua entre la atmósfera y las masas de agua
Mayor calor de fusión latente que cualquier otro líquido, excepto el amoníaco	Temperatura estabilizada en el punto de congelación del agua
Mayor capacidad de calor que cualquier otro líquido excepto el amoníaco	Estabilización de temperaturas de organismos y regiones geográficas

Fuente: Revista Química Viva - Número 3, año 11, diciembre 2012

### 3.3 El agua como un disolvente universal

La molécula de agua está formada por dos átomos de hidrógeno unidos a un átomo de oxígeno  $H_2O$ ; Los tres átomos no están en línea recta; en cambio, forman un ángulo de  $105^\circ$ . Debido a la estructura doblada del agua y al hecho de que el átomo de oxígeno atrae a los electrones negativos más fuertemente que los átomos de hidrógeno, la molécula de agua se comporta como un dipolo que tiene cargas eléctricas opuestas en cada extremo. El dipolo de agua puede ser atraído por iones con carga positiva o negativa. Por ejemplo, cuando  $NaCl$  se disuelve en agua como iones  $Na^+$  positivos e iones  $Cl^-$  negativos, los iones positivos de sodio están rodeados por moléculas de agua con sus extremos negativos apuntando a los iones, y los iones cloruro están rodeados por moléculas de agua con sus extremos positivos apuntando en los iones negativos. Este tipo de atracción para los iones es la razón por la cual el agua disuelve muchos compuestos iónicos y sales que no se disuelven en otros líquidos (Manahan 2000).

Una segunda característica importante de la molécula de agua es su capacidad para formar enlaces de hidrógeno. Los enlaces de hidrógeno son un tipo especial de enlace que se puede formar entre el hidrógeno en una molécula de agua y el oxígeno en otra molécula de agua. Esta unión

tiene lugar porque el oxígeno tiene una carga negativa parcial y el hidrógeno es una carga positiva parcial (Manahan 2000).

La gran capacidad de disolución del agua y su elevada reactividad hace que el agua natural contenga gran cantidad de sustancias disueltas, que entran a formar parte de la composición de muchas sustancias (hidratos, agua de formación, etc.) y que ataque a muchas otras directamente o a través de las sustancias que lleva disueltas (hidrolisis, oxidaciones, etc.) (Consejo Consultivo del Agua 2016).

El agua puede disolver tanto gases, como líquidos, como sólidos. El mecanismo de disolución puede ser unas veces un mecanismo simple como la disolución de nitrógeno o de azúcar, otras veces un mecanismo de simple ionización como la disolución de la sal común, pero en otras ocasiones a veces se trata de mecanismos mucho más complejos en las que intervienen reacciones químicas con la propia agua (disolución de  $\text{NH}_3$ ) o con el agua y otras sustancias disueltas en la misma (disolución de calizas en presencia de  $\text{CO}_2$ , formación de complejos como en la disolución de metales pesados con ayuda de ácidos húmicos o ciertas sustancias orgánicas, etc.) o a través de alteraciones previas producidas por el agua en materiales en sí insolubles (ataque de silicatos) (Custodio *et al.*, 1976).

### **3.4 Factores antropogénicos y naturales que determinan la composición química del agua**

Durante la precipitación pluvial, el agua cae sobre la superficie de la tierra y establece contacto con rocas, sedimentos y suelos, así como con los habitantes tanto animales como vegetales de la superficie terrestre. Se llevan a cabo reacciones químicas que modifican aún más la composición del agua. Estas reacciones se pueden considerar en términos generales como una titulación ácido-base, global gigantesca en donde los ácidos del agua de lluvia ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ ) neutralizan las bases de las rocas. Como la composición de la superficie terrestre y el grado de activación biológica, así como su naturaleza (incluyendo la actividad del hombre) varían de un lugar a otro, se puede esperar que estas reacciones produzcan aguas de muy diversas composiciones. El tiempo y el grado de contacto entre el agua y las rocas también influyen sobre la composición de la solución (Jenkis y Vernon, 1999)

### **3.5 Influencia de factores antropogénicos en la composición del agua**

Cada vez la disponibilidad de agua para consumo humano es menor, debido al crecimiento poblacional, incrementos en consumo per cápita, la contaminación de fuentes de agua y en general, al manejo inadecuado de las cuencas hidrográficas (Radulovich 1997). La cantidad de agua es constante, la calidad de la misma va disminuyendo rápidamente como consecuencia de la contaminación de las fuentes de agua, lo cual generaría estrés hídrico a nivel general en la mayoría de los países, siendo más notorio en las ciudades capitales (Faustino 1997).

El aumento de la población es implícito a la cantidad de desechos generados, en el que los vertederos de basura son focos posibles de contaminación, al arrastrar la lluvia en forma superficial o filtrándose a través del suelo, ciertos elementos solubles que se incorporan a los recursos de agua existentes y aun en mayor grado si entran directamente en contacto con aguas superficiales o subterráneas. Las implicaciones de consumir agua contaminada son variadas; en el contexto de salud pública, la OMS (1998) calcula que aproximadamente un 80% de todas las enfermedades y más de una tercera parte de las defunciones en los países en desarrollo tienen por causa el agua contaminada, ya que alrededor del 70% del agua consumida directamente por humanos en zonas rurales está altamente contaminada por heces fecales (Radulovich 1997).

Lo anterior posee relación con la escorrentía superficial, una forma de contaminación difusa o no localizada. La contaminación por fuentes no localizadas contribuye significativamente con niveles altos de agentes patógenos en masas de aguas superficiales, especialmente coliformes (Ongley 1997). En este sentido, un suministro de agua en cantidad y calidad suficiente contribuiría a reducir la incidencia de enfermedades transmitidas por la vía fecal-oral (OMS 1998).

#### **3.5.1 Agricultura**

Las áreas agrícolas con prácticas de manejo del suelo poco apropiadas, y con uso indiscriminado de pesticidas y fertilizantes pueden causar cambios en la cantidad y en las propiedades físicas, químicas y biológicas del agua, tales como: incremento de sedimentos (sólidos suspendidos), aumento de la materia orgánica, incremento de la demanda biológica de oxígeno (DBO), disminución de la concentración de oxígeno, cambios en la concentración de nutrientes, de la temperatura, pH, alcalinidad, microorganismos (bacterias y virus), alta concentración de

tóxicos (pesticidas y fertilizantes) y la alteración de la estructura de la fauna acuática residente (Pinder y Farr, 1987).

Estos parámetros son empleados para la evaluación de los impactos; es así como un considerable enriquecimiento orgánico y de otras sustancias, junto con la ocurrencia de la estación seca, producen el deterioro de la calidad del agua y del ecosistema (Pinder y Farr, 1987).

Por otra parte, en el sistema de explotación agrícola bajo el sistema de cultivo roza, tumba y quema, el suelo libera una gran proporción de nutrientes almacenados en la biomasa superficial dentro del suelo (Juo y Manu, 1996), la cual es directamente proporcional a la carga inicial de combustible por unidad de área (ton/ha de materia seca), intensidad del fuego y la rápida tasa de recuperación de la vegetación (Hudson *et al.*, 1983). Una porción significativa de estos nutrientes liberados es arrastrada hacia las fuentes de agua mediante escorrentía, mientras que, otra porción se pierde por volatilización o simplemente se disuelven en el agua de escorrentía (Juo y Manu, 1996), debido al incremento de la solubilidad por efecto de la temperatura del fuego (p.e. fosfatos) (Buch, 1988). Pérdidas de nutrientes provenientes de áreas quemadas han sido reportadas por Belillas y Roda (1993), quienes registraron altas concentraciones químicas de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en el agua, comparadas con áreas no quemadas.

### **3.5.2 Ganadería**

En muchas partes del mundo, el pastoreo es una práctica común del uso de la tierra, con limitados impactos sobre los constituyentes químicos disueltos en el agua superficial, sin embargo, este enunciado no es cierto cuando ocurre un sobrepastoreo (Brooks *et al.*, 1991). Es por ello que la ganadería reviste importancia para la calidad del agua, ya que generalmente, las áreas de pastos tienden a ser ubicadas en lugares húmedos junto a cauces de agua o sobre terrenos escarpados, así, contaminantes provenientes de estas áreas pueden ser lavadas con facilidad y rapidez hacia aguas superficiales (Line *et al.*, 2000), ya sea como sólidos suspendidos, nutrientes o como organismos patógenos (Fajardo *et al.*, 2001).

Los factores que controlan y disminuyen los efectos de la contaminación del agua por estiércol, están íntimamente relacionados a la capacidad de absorción del nitrato por los cultivos y la capacidad de absorción del amonio por parte del suelo (Vidal *et al.*, 2000), siendo afectada, esta última, por la compactación del suelo, lo que provoca una baja liberación de amonio en el suelo y

consecuentemente ser transportados a fuentes de aguas superficiales mediante escorrentía (Zhao *et al.*, 2001).

Con respecto al fosforo encontrado en el agua, proveniente del estiércol de la ganadería, Eghball *et al.*, (2000), encontró que, al comparar aplicaciones realizadas con fertilizantes químicos y estiércol, son estos últimos los que aportan mayor concentración de fósforo (P) disuelto en la escorrentía después de ocurrida una precipitación de moderada intensidad.

### **3.6 Influencia de los factores naturales en la composición del agua**

Se dice que tres mecanismos naturales controlan la química de lagos y ríos: la precipitación atmosférica, el predominio de rocas y el proceso de evaporación y cristalización (Clarke 1924). La salinidad total de las aguas superficiales continentales está determinada normalmente por la presencia de los cationes sodio, calcio, magnesio y potasio y de los aniones cloruros, sulfato y bicarbonato-carbonato. La media mundial de salinidad de las aguas continentales es de alrededor de 120 mg L<sup>-1</sup> pero varía de un continente a otro (Livingstone 1961)

Las composiciones químicas de las aguas están ampliamente controladas por el intemperismo de las rocas, la concentración de evaporación y la precipitación de carbonato de calcio. A su vez, el intemperismo se produce mayormente como consecuencia de procesos de disolución, hidrólisis, de óxido reducción y de formación de complejos con sustancias inorgánicas u orgánicas (Kilham 1971b).

Las aguas concentradas (> 1,000 ppm del total de sales disueltas; TDS) están dominadas por la sal del océano o depósitos sedimentarios antiguos. El principal mecanismo que controla la evolución de las aguas durante la concentración de evaporación es la precipitación de CaCO<sub>3</sub>, (Kilham 1971b).

Los minerales de carbonato comienzan a precipitar una vez que se alcanza la saturación con respecto a la calcita. Como regla, esto representa una alcalinidad de -2.5 mEq L<sup>-1</sup> (Gregg 1995) o aproximadamente 250 ppm de TDS. Por encima de 1,000 ppm de TDS, la mayoría de los iones de Ca<sup>2+</sup> se han eliminado de la solución. Las únicas excepciones a esta regla son los manantiales de baja alcalinidad y los lagos de cloruro de sodio relativamente diluidos. Los manantiales de baja alcalinidad comúnmente emanan de rocas metamórficas precámbricas. (Symoens 1968).

El proceso de evaporación-cristalización ocurre cuando produce una pérdida sustancial de carbono durante cada paso de la concentración de evaporación  $\text{CaCO}_3$ , la precipitación es principalmente responsable de la pérdida de carbonato de aguas diluidas. La calcita predomina en los sedimentos porque la proporción molar / Mg en las aguas son generalmente bajas (Müller y Förstner 1972).

El carbono también se pierde de lagos alcalinos y manantiales por  $\text{CO}_2$ , desgasificando. En salmueras, el carbono se precipita como trona y otros minerales de carbonato (Eugster y Jones, 1979). La alcalinidad (y por lo tanto el contenido de carbono) de estas aguas también se ve afectada por dos procesos adicionales.

El intemperismo inverso (formación de arcilla) disminuye la alcalinidad (Von Damm y Edmond, 1984), mientras que la pérdida de azufre (como sulfuro) en los sedimentos o la atmósfera aumenta la alcalinidad (Kilham 1984).

### **3.6.1 Temperatura**

La temperatura influye en la solubilidad de las sales y los gases, también en la disociación de las sales disueltas y por lo tanto en la CE y el pH del agua (Seoánez 1999). La temperatura en un río es muy importante ya que afecta las características físicas, biológicas y químicas de un río. Así la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, la velocidad de fotosíntesis de algas y plantas acuáticas, la velocidad metabólica de organismos y la sensibilidad de organismos a desechos tóxicos, parásitos y enfermedades, pueden ser afectados (Mitchell et al. 1991).

### **3.6.2 Vegetación forestal**

En el transcurso del siglo pasado, se ha especulado sobre el papel de la vegetación y principalmente del bosque como sistema estabilizador, en la conservación del suelo y sobre el agua (régimen hidrológico y calidad). Basta recordar una pragmática del reinado de Luis VI de Francia (1216), titulada “aguas y Bosques”, que tendría vigencia hoy.

Con respecto a la composición química del agua de lluvia que entra en contacto con la vegetación forestal, Tamm (1951) encontró en el agua de lluvia bajo poblaciones de árboles una cantidad considerable mayor de calcio, sodio y potasio comparada con un terreno libre de vegetación.

Madgwick y Ovington (1959), realizaron investigaciones comparativas que demuestran la influencia de la cubierta forestal sobre la composición química del agua que llega a los estratos inferiores. Todos los nutrientes medidos en el agua de lluvia dieron valores significativamente superiores, bajo la cubierta del bosque que, en terrenos libres de vegetación, los resultados se pueden observar en el Cuadro 3-2:

Cuadro 3-2. Comparativa de la composición química de agua en terrenos forestales

	<b>Sodio</b> kg/ha año	<b>Potasio</b> kg/ha año	<b>Calcio</b> kg/ha año	<b>Magnesio</b> kg/ha año
Bajo cubierta Forestal <sup>1</sup>	33	24	24	10
Terreno libre de Vegetación	19	3	11	4

**Fuente:** Madgwick y Ovington (1959)

<sup>1</sup>Las cantidades de elementos contenido en el agua, se obtuvo con todos los árboles vivos que comprenden cada bosque, ha sido estimado multiplicando el peso de elementos en los árboles promedio por el número de árboles por hectárea.

El contenido de las aguas de lluvia en sustancias químicas muestra un ritmo anual mucho más acentuado bajo la cubierta forestal que en terrenos libres de vegetación. Varía poco de una especie arbórea a otra, aunque las diferencias son claras entre poblaciones de coníferas y árboles caducifolios. El contenido del agua en nutrientes durante la estación cálida es superior bajo los árboles caducifolios que, en los árboles de coníferas, mientras que después de la caída de las hojas sucede al revés. De todos modos, en invierno el bosque caducifolio sigue recibiendo más nutrientes que el terreno libre de vegetación. Esto se explica por el lavado de ramas (Tamm 1951).

La vegetación forestal como sistema más evolucionado, puede ocasionar mayor o menor cantidad de escorrentía, regula las avenidas, transformando las escorrentías superficiales en dotaciones hídricas del suelo, mejora y conserva el suelo, logrando un cambio potencial en la composición de las aguas, mejorando su calidad y favoreciendo la economía. Además, engrandece paisajes y ambientes óptimos en cuanto marco para la vida, esparcimiento, estudio y descanso del hombre (TRAGSA *et al.*, 1998).

### **3.7 Origen de las sales y sus procesos de acumulación en aguas naturales**

Las sales se originan a partir de los procesos de intemperismo de los minerales y rocas que constituyen la corteza terrestre, la cual, de acuerdo con Kovda (1973) tiene la siguiente composición:

Cuadro 3-3. Composición de la corteza terrestre

<b>Elemento</b>	<b>Composición (%)</b>	<b>Elemento</b>	<b>Composición (%)</b>
<b>Oxígeno</b>	49.13	<b>Hidrógeno</b>	1.00
<b>Silicio</b>	26.00	<b>Titanio</b>	0.61
<b>Aluminio</b>	7.45	<b>Carbono</b>	0.35
<b>Hierro</b>	4.20	<b>Cloro</b>	0.20
<b>Calcio</b>	3.25	<b>Fósforo</b>	0.12
<b>Sodio</b>	2.40	<b>Azufre</b>	0.10
<b>Magnesio</b>	2.35	<b>Manganeso</b>	0.10
<b>Potasio</b>	2.35		

Fuente: Kovda, 1973.

El intemperismo de las rocas que contienen estos elementos, los libera mediante reacciones de hidratación y disolución de los minerales. Estos posteriormente constituyen las sales que pasan a formar parte de las soluciones y que son conducidas y distribuidas a diferentes zonas, como depósitos continentales o finalmente al mar. Estas sales transportadas en el agua salinizan los suelos agrícolas.

No todos los elementos son extraídos en igual intensidad ya que su velocidad de migración y acumulación es inversamente proporcional al coeficiente de energía de los iones (Kovda 1973). De lo cual podemos deducir que los cloruros, nitratos, sulfatos y carbonatos de iones alcalinotérreos, son las sales que se forman con mayor facilidad como consecuencia del intemperismo y sus bajos coeficientes de energía. Por lo tanto, su precipitación es menor, y por esta razón permanecen más tiempo solubles en el agua, tal es el caso del NaCl (Can, 2011).

Para entender el proceso que da origen a las sales, es necesario distinguir los diferentes ciclos de acumulación de sales que dan origen a los diferentes tipos de suelos.

### **3.7.1 Ciclos de acumulación de sales**

Los procesos de acumulación de sales, están conectados con tipos definidos de relieve y con ciertas condiciones geomorfológicas e hidrogeológicas. La acumulación de sal en diferentes ciclos está vinculada geomorfológicamente a las tierras bajas o partes que componen las tierras bajas, por ejemplo: llanuras de inundación, deltas, valles, terrazas bajas de ríos (bancos), lagos o terrazas costeras (Kovda, 1973).

La orografía tiene importancia debido a que hay mayor acumulación de sales en cuencas cerradas, por el contrario, en cuencas exorreicas no ocurre esta acumulación porque las sales son lavadas y transportadas por los ríos directamente al mar, por ello en los flujos superficiales de estas cuencas existen bajas concentraciones iónicas. La acumulación de sales en los continentes está en relación con el movimiento y redistribución mediante las corrientes de agua en las cuencas, mientras que en los deltas de los ríos utilizados en la agricultura la acumulación de sales está en relación con el riego agrícola (Can, 2011).

Desde el punto de vista de la hidrogeología, los procesos están relacionados con niveles freáticos altos (dentro de los límites del aumento de soluciones capilar y película capilar) (Kovda, 1973).

Hidrológicamente, los procesos de acumulación de sales ocurren particularmente en regiones donde la escorrentía es escasa o virtualmente ausente, y donde el balance del agua subterránea no está regulado por escorrentía, sino por evaporación y transpiración. La acumulación de sales generalmente está conectada con las condiciones de los procesos de formación de suelos acumulativos contemporáneos o antiguos (es decir, que involucran aguas subterráneas) (Kovda, 1973).

Kovda (1973), establece que en la geografía y geoquímica los procesos están relacionados con la formación de suelos salinos, es esencial distinguir entre los siguientes ciclos de acumulación de sales:

1. **Continental.** Se relacionan con el movimiento, la redistribución y la acumulación de sales carbónicas, sulfúricas y clorhídricas en las regiones intracontinentales que no tienen drenaje natural. Dependiendo del origen de las sales acumuladas en suelos y aguas (es decir, si son producto de la intemperie y la formación de suelos en rocas ígneas, o están relacionadas con la redistribución de sales anteriormente acumuladas en las masas de rocas sedimentarias que contienen sales).
2. **Costeros.** Se relaciona con la acumulación de sales marinas, principalmente cloruros de sodio en las llanuras costeras de las zonas bajas y en las orillas de las bahías poco profundas.

3. **Deltaicos.** Son comunes y de gran importancia para la humanidad. Se caracterizan por una combinación compleja de procesos de movimiento y por la acumulación de sales llevadas desde el continente por ríos y arroyos o desde el mar en varios momentos
4. **Artesianos.** Se debe a una conexión con la evaporación de aguas subterráneas profundas a través de fracturas tectónicas y estructuras destruidas: volcanes y chorros de lodo o en vastas depresiones continentales profundas.
5. **Antropogénicos.** Son el resultante de errores en las actividades económicas del hombre o por ignorancia de las leyes de acumulación de sal (Salinización de suelos irrigados a través de un aumento del nivel freático, salinización de prados a través de riego excesivo por aguas mineralizadas, inundación por aguas de pozos mineros, por aguas de petróleo o por otras aguas industriales).

Dado que las aguas naturales, particularmente las mineralizadas, contienen un complicado complejo de compuestos disueltos, el proceso de evaporación y transpiración provoca un aumento en la mineralización de las aguas subterráneas, acumulación de componentes débilmente solubles (minerales de arcilla secundaria, sílice, carbonato de calcio, yeso) en la fase sólida, que forman concreciones o horizontes cementados. En las soluciones de suelo, las aguas subterráneas y las costras de sal se acumulan sales altamente solubles (carbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos de álcalis y, hasta cierto punto, tierras alcalinas en diversas proporciones) (FAO-UNESCO, 1993).

### **3.7.2 Solubilidad de las sales en el agua natural**

La solubilidad de las sales está relacionada con la temperatura y el tipo de sal, es importante esta propiedad en el riego agrícola porque, generalmente, sí la concentración salina es elevada ocasiona efectos perjudiciales a los cultivos. Se ha observado que las sales más nocivas son aquellas cuya solubilidad es alta, ya que las que son poco solubles precipitan antes de alcanzar niveles perjudiciales para los cultivos (Kovda, 1973), en la Figura 3-1. Se observa la relación de la solubilidad de las sales con respecto de la temperatura:

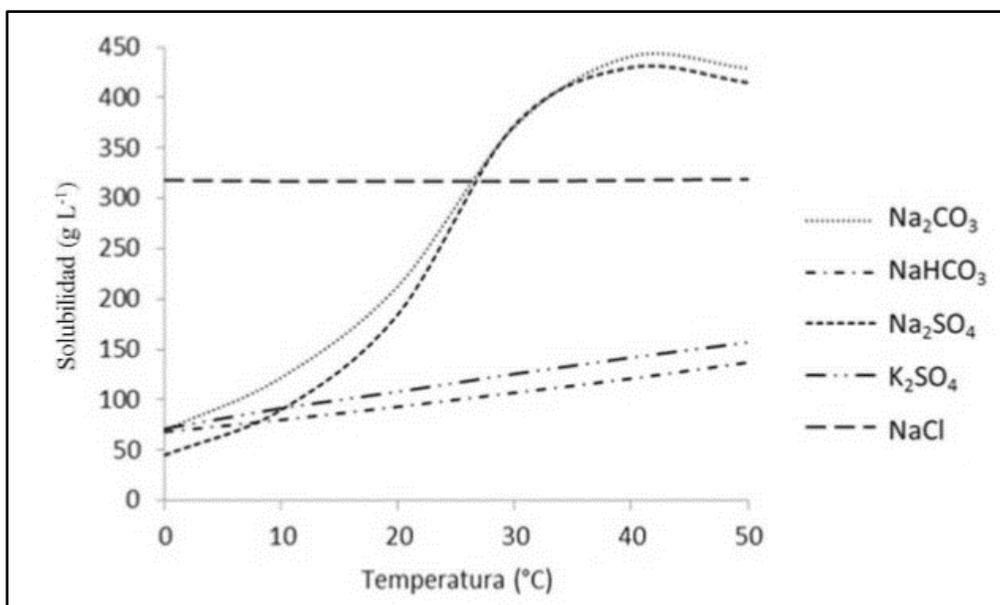


Figura 3-1. Solubilidad de las sales con respecto a la temperatura

En la Figura 3-1 se observa que la solubilidad disminuye junto con la temperatura en todas las sales excepto el NaCl que es la más soluble y no varía con la temperatura, es decir, su solubilidad casi permanece constante en comparación con las demás sales, por esto es muy perjudicial a ciertos niveles de concentración para algunos cultivos (Kovda, 1973).

En las soluciones la presencia de iones comunes provoca la disminución de la solubilidad de las sales, en cambio, con iones diferentes suele aumentar la solubilidad de la sal menos soluble, por ejemplo, el yeso tiene una solubilidad de  $2.06 \text{ g L}^{-1}$  pero en presencia de NaCl esta se incrementa hasta  $7.09 \text{ g L}^{-1}$  (Can, 2011). 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 últimas sales que se forman en los suelos son los nitratos y los boratos, pero es muy raro encontrarlas. Los nitratos de los suelos pueden haber sido inducidos por la fertilización, mientras

que los boratos en muy alta concentración ocurren en zonas con actividad volcánica (Gméling *et al.*, 2007).

### 3.8 Iones mayoritarios, minoritarios y trazas, presentes en aguas Naturales

Las relaciones de equivalentes entre los principales iones en el orden mundial, tienden a ser:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$  y  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ , aunque en regiones costeras, estas relaciones pueden variar significativamente. Las concentraciones de  $\text{K}^+$  y  $\text{Cl}^-$  permanecen constantes, es decir sufren pequeñas variaciones inducidas por cambios ambientales o por su utilización por seres vivos (Manaham 1991b). En cambio, las concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  dependen de procesos de precipitación-disolución, del metabolismo microbiano y de cambios climáticos. Algunos elementos minoritarios como el silicio, el nitrógeno, el fósforo, el hierro, tienen una gran importancia desde el punto de vista biológico, aunque no influyen en forma significativa en la salinidad de un cuerpo de agua (Wetzel, 1983).

La rapidez de los procesos biológicos, en contraste con los procesos físico-químicos, hace que el tiempo de residencia de estos nutrientes en los cuerpos de agua sea mucho menor que el de los iones responsables de la salinidad. En general, un elemento es considerado minoritario en medios naturales cuando su concentración está comprendida entre el 1 y el 0,01 %, de la misma manera, se denomina traza al elemento cuya concentración es menor del 0,01 % (Stumm y Morgan, 1995).

Las moléculas de agua, al ser polares, se disponen alrededor de los grupos polares del soluto, llegando a desdoblarse los compuestos iónicos en aniones (iones negativos) y cationes (iones positivos), a continuación, se describen los más relevantes con base en Custodio *et al.*, 1976.:

#### 3.8.1 Cationes y sustancias catiónicas.

##### **Ion Sodio, $\text{Na}^+$**

**Características químicas:** Solubilidad muy elevada y muy difícil de precipitar. Es afectado fácilmente por el cambio de bases. Suele ir asociado al ion  $\text{Cl}^-$ ; aunque no siempre sucede así. Las aguas naturales con elevados contenidos de  $\text{Na}^+$  suelen tener contenidos elevados en  $\text{F}^-$ .

**Concentraciones:** Entre 1 y 150 ppm en aguas dulces, no siendo raro encontrar contenidos mucho mayores, hasta varios miles de ppm. El agua de mar tiene alrededor de 10,000 ppm, las salmueras

naturales pueden llegar a tener 100,000 ppm, siendo un límite que rara vez se sobrepasa el de 500 mEq L<sup>-1</sup> (=110,000 ppm).

**Nocividad y toxicidad:** Las aguas con concentraciones elevadas en sodio son perjudiciales a las plantas al reducir la permeabilidad del suelo; son especialmente nocivas si las concentraciones de Ca y Mg son bajas. Aguas con contenidos elevados en CO<sub>3</sub>HNa originan problemas de espumas en calderas.

### **Ion Potasio, K<sup>+</sup>**

**Características químicas:** Solubilidad muy elevada y difícil de precipitar. Es afectado fácilmente por el cambio de bases y es absorbido de forma muy poco reversible por las arcillas en formación (paso de montmorillonita a illita), para formar parte de su estructura, circunstancia que lo diferencia notablemente del Na<sup>+</sup>. Por ello las aguas naturales, a pesar de la mayor abundancia de K<sup>+</sup> en muchas rocas, tiene mucho menos K<sup>+</sup> que Na<sup>+</sup> excepto en las muy diluidas.

**Concentraciones:** Entre 0.1 y 10 ppm en aguas dulces. Extraordinariamente se pueden tener algunos cientos de ppm y sólo muy raramente se puede tener salmueras de hasta 100,000 ppm. El agua del mar tiene alrededor de 400 ppm.

**Nocividad y toxicidad:** No presenta problemas especiales a las concentraciones habituales y es un elemento vital para las plantas.

### **Ion Calcio, Ca<sup>++</sup>**

**Características químicas:** De los cationes encontrados en la mayoría de los sistemas de agua dulce, el calcio generalmente tiene la concentración más alta. La química del calcio, aunque bastante complicada, es más simple que la de los iones de metales de transición que se encuentran en el agua. El calcio es un elemento clave en muchos procesos geoquímicos, y los minerales constituyen las principales fuentes de iones de calcio en las aguas. Entre los principales minerales contribuyentes están el yeso, (sulfato de calcio dihidrato: CaSO<sub>4</sub>\*2H<sub>2</sub>O); anhidrita, CaSO<sub>4</sub>; dolomita, CaMg (CO<sub>3</sub>)<sup>2</sup>; y calcita y aragonita, que son formas minerales diferentes de CaCO<sub>3</sub>.

Sales de moderadamente solubles a muy solubles. Es muy fácil de precipitar como CO<sub>3</sub>Ca. Su química va muy asociada a la de los iones CO<sub>3</sub>H<sup>-</sup> y CO<sub>3</sub><sup>=</sup> en muchas aguas naturales, pudiéndose

precipitar y disolver con facilidad al cambiar el pH o la presión parcial de CO<sub>2</sub>. Puede ser afectado por el cambio de bases.

**Concentraciones:** Entre 10 y 250 ppm en aguas dulces, y puede llegar a 600 ppm en aguas selenitosas. El agua del mar contiene alrededor de 400 ppm. Excepcionalmente se pueden tener 50,000 ppm en salmueras de Cl<sub>2</sub>Ca.

**Nocividad y toxicidad:** El mayor inconveniente va asociado al aporte de dureza y producción de incrustaciones.

#### **Ion Magnesio, Mg<sup>++</sup>**

**Características químicas:** Propiedades similares a las del ion calcio, pero más solubles y algo más difícil de precipitar.

**Concentraciones:** Entre 1 y 100 ppm en aguas dulces, y puede llegar a veces a algunos miles de ppm en aguas salinas o salmueras. El agua del mar contiene 120 ppm.

**Nocividad y toxicidad:** Propiedades laxantes y da sabor amargo al agua de bebida si hay algunos centenares de ppm. Contribuye a la dureza del agua y además a pH elevado puede dar Mg(OH)<sub>2</sub> incrustante

### **3.8.2 Aniones y sustancias aniónicas**

#### **Ion Cloruro, Cl<sup>-</sup>**

**Características químicas:** Sales en general muy solubles. Muy estable en disolución y muy difícilmente precipitable. No se oxida ni se reduce en aguas naturales. En general va asociado al ion Na<sup>+</sup>; en especial en aguas muy salinas, pero el número de miliequivalentes de ambos iones no siempre es igual.

**Concentraciones:** Entre 10 y 250 ppm en aguas dulces, no siendo raro encontrar contenidos mucho mayores hasta varios miles de ppm. El agua de mar tiene entre 18,000 y 21,000 ppm. Las salmueras naturales pueden llegar a tener 220,000 ppm (Saturación).

**Nocividad y toxicidad:** Más de 300 ppm comunican sabor salado al agua de bebida, pero no es perjudicial por lo menos hasta algunos miles de ppm. Es esencial para la vida. Contenidos elevados son perjudiciales para muchas plantas y comunican corrosividad al agua.

### **Ion Sulfato, $\text{SO}_4^-$**

**Características químicas:** Sales moderadamente solubles a muy solubles excepto las del Estroncio (Sr) (60 ppm) y de Bario (Ba) (2 ppm). En agua pura el sulfato de calcio (yeso) ( $\text{SO}_4\text{Ca}$ ) satura a 1500 ppm, y puede llegar hasta 7200 ppm en aguas salinas. En medios reductores con abundante materia orgánica puede sufrir una reducción bacteriana a S o  $\text{S}^-$ , pero en general es estable. Es difícil precipitarse químicamente ya que las sales solubles Sr y Ba son muy escasas en la naturaleza, pero pueden separarse de la solución por concentración si existe una evaporación importante.

**Concentraciones:** Entre 2 y 150 ppm en aguas dulces y puede llegar a 5000 ppm en aguas salinas si existe Ca y hasta 200,000 si está asociado a Mg y Na en ciertas salmueras. El agua de mar contiene alrededor de 3000 ppm.

**Nocividad y toxicidad:** Las aguas selenitosas (elevado contenido en sulfatos) no quitan la sed y tienen sabor poco agradable y amargo. Por sí mismo o si va asociado a Mg o Na en cantidad importante puede comunicar propiedades laxantes. En cantidades elevadas puede ser perjudicial para las plantas. Más de algunos centenares de ppm perjudican a la resistencia del hormigón y cemento.

### **Iones Bicarbonato y Carbonato, $\text{CO}_3\text{H}^-$ y $\text{CO}_3^-$**

**Características químicas:** Existe una profunda relación entre el  $\text{CO}_2$  gas y el  $\text{CO}_2$  disuelto,  $\text{CO}_3\text{H}^-$ ,  $\text{CO}_3^-$  y pH. Estos iones comunican alcalinidad al agua en el sentido que dan capacidad de consumo de ácido al producir una solución tampón. No son oxidables ni reducibles en aguas naturales. Se puede precipitar con mucha facilidad como  $\text{CO}_3\text{Ca}$ .

**Concentraciones:** El ion bicarbonato varía entre 50 y 350 ppm en aguas dulces y puede llegar a veces hasta 800 ppm. El agua del mar tiene alrededor de 100 ppm. El ion carbonato está en concentraciones mucho menores que el bicarbonato y si el  $\text{pH} < 8.3$  se le considera cero. En aguas

alcalinas con  $\text{pH} > 8.3$  puede haber cantidades importantes, hasta 50 ppm en aguas naturales. El agua del mar tiene menos de 1 ppm.

**Nocividad y toxicidad:** No presenta problemas de toxicidad. Las aguas bicarbonatadas sódicas son malas para riego, debido a la fijación del  $\text{Na}^+$  en el terreno y la creación de un medio alcalino. El equilibrio entre  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_3\text{H}^-$ ,  $\text{CO}_3^{=}$  y el pH es determinante de la corrosividad o incrustabilidad

### **Sílice, $\text{SiO}_2$**

**Características químicas:** La hidroquímica del silicio no está del todo aclarada, pero se cree que la mayoría de la sílice está como  $\text{SiO}_4\text{H}_4$ , en parte disuelta y en parte coloidal, y solo una pequeña parte ionizada ( $\text{SiO}_4\text{H}_3^-$ ) a pH normales, las aguas fuertemente básicas pueden tener cantidades importantes de sílice iónica, pero son muy raras en la naturaleza. La sílice iónica contribuye algo a la alcalinidad del agua. El  $\text{CO}_2$  juega un importante papel al evitar que el pH suba, limitando así la solubilidad de la sílice. El cuarzo y sus formas alotrópicas son muy pocos solubles pero la sílice amorfa lo es mucho más (50 ppm a  $0^\circ\text{C}$ , 160 ppm a  $25^\circ\text{C}$  y 400 ppm a  $100^\circ\text{C}$  en agua pura).

**Concentraciones:** La mayoría de las aguas naturales tienen entre 1 y 40 ppm en  $\text{SiO}_2$  y puede llegar hasta 100, en especial en aguas bicarbonatadas sódicas. En aguas muy básicas se puede llegar a 100 ppm.

**Nocividad y toxicidad:** El mayor inconveniente está relacionado con la incrustabilidad en calderas y calentadores.

## **3.9 Calidad del Agua**

El concepto de calidad de agua guarda estrecha relación con el uso que se le pretende dar. La civilización actual la emplea para: uso doméstico, industrial, hidroeléctrico, navegación, agrícola, pecuario, vida acuática y recreación, donde cada actividad tiene unas exigencias específicas en cuanto a su calidad, y a su vez, origina cambios en el agua utilizada. Los problemas surgen cuando un usuario afecta la calidad del agua en forma tal, que su valor queda disminuido para otro uso (Kirchmer, 1977). Autores como Ayers y Wescot (1987), consideran que el concepto de calidad de agua se refiere a las características del agua que pueden afectar su adaptabilidad a un uso específico, o sea a la relación que exista entre la calidad del agua y las necesidades del usuario.

Los usos específicos pueden tener diferente requerimiento de calidad, así el agua puede ser considerada de mejor calidad, si causa menos problemas. Por ejemplo, el agua de un río puede ser considerada con adecuada calidad para ciertos sistemas de riego, pero su carga de sedimentos o concentraciones de coliformes, inaceptable para consumo potable, sin antes ser tratada (Ayers y Wescot, 1987).

En forma general existen pocos términos relacionados al concepto de calidad del agua, el cual puede ser definido como el tratamiento de las características físicas químicas y biológicas del agua (Sanders *et al.*, 1983).

### **3.10 El agua para uso agrícola**

Al fin del siglo XVII, las áreas irrigadas en el mundo solamente representaban el 2% de la extensión presente y básicamente se concentraban en el sureste, el oriente y el centro del continente asiático; en el delta del río Nilo, en África, y en pequeñas porciones del continente americano. Durante el siglo XVIII estas áreas crecieron a tasas del 2% anual. Pero fue hasta mediados del siglo XX, con la revolución tecnológica conocida como “revolución verde”, que las áreas irrigadas se incrementaron exponencialmente. En el último medio siglo, la tasa media anual de crecimiento de las superficies irrigadas aumentó dos a tres veces. Para fines del siglo ya existían 2.5 millones de km<sup>2</sup> de este tipo de área en el mundo: 170 mil km<sup>2</sup>, en Europa; 1.8 millones de km<sup>2</sup>, en Asia; 90 mil km<sup>2</sup>, en África; 275 mil km<sup>2</sup>, en Norteamérica; 67 mil km<sup>2</sup>, en Sudamérica y 17 mil km<sup>2</sup> en Australia y Oceanía (Toledo, 2002).

Los problemas que enfrenta actualmente la agricultura irrigada figura entre las mayores dificultades que sufre la humanidad a nivel global. Hoy se acumulan las evidencias que demuestran que esta clase de agricultura tiene límites ecológicos y no puede enfrentar exitosamente las necesidades crecientes de producción de alimentos porque las disponibilidades de agua se han convertido en un claro factor limitante de sus líneas tecnológicas, especialmente en algunas áreas pobres del mundo afectadas por la carencia de agua (Toledo, 2002).

Una gran cantidad de análisis realizados en diferentes contextos ecológicos y sociales corroboran que la eficiencia en el uso del agua en la agricultura de riego es solamente de 40% (Postel, 1997), lo que significa que más de la mitad del agua que se emplea en esta clase de agricultura jamás llega a transformarse en alguna clase de alimentos. Desde la perspectiva de sus

costos energéticos, la eficiencia global de la irrigación en muchas cuencas del mundo no es sensiblemente mayor que las tecnologías empleadas por la agricultura tradicional. En muchos casos esta agricultura mecanizada ha demostrado ser mucho menos eficiente energéticamente que la agricultura tradicional, como son los casos de las tecnologías adecuadas en las montañas andinas, en las montañas y las planicies de inundación centroamericanas y en los valles centrales mexicanos. A esto habría que agregarle otros factores desfavorables para la agricultura industrializada como las pérdidas en la cosecha, el transporte y la comercialización, que ascienden al 20% de la producción en esta clase de agricultura (Toledo, 2002).

### **3.11 Calidad de las aguas para riego**

La importancia de conocer la calidad de agua para riego, es poder predecir su efecto sobre el suelo y los cultivos (Richards, 1990).

Los problemas más comunes resultantes del uso del agua para riego agrícola se relacionan con salinidad, alcalinidad, infiltración del agua en el suelo, toxicidad de iones presentes en ella, combinaciones de los anteriores y efectos causados por sólidos en suspensión, metales pesados, corrosividad, entre otros (Can, 2011). A continuación, se describen los diferentes índices que evalúan las concentraciones de la calidad del agua:

#### **3.11.1 Índice de Carbonato de Sodio Residual (CSR)**

Por lo general, las aguas para riego ricas en iones bicarbonato son las que provienen de acuíferos formados por basaltos, las provenientes de zonas urbano-industriales, y aguas subterráneas en las que se tienen procesos reductores de mucha intensidad (Antipov-Karataev, 1967). En estas aguas existe la tendencia de los iones calcio y magnesio a precipitarse en forma de carbonatos a medida que la solución del suelo se vuelve más concentrada. Las reacciones de precipitación de los iones de calcio y de magnesio no se completan en circunstancias ordinarias, pero a medida que van dando lugar, las concentraciones de calcio y magnesio se van reduciendo, aumentando de esta manera la proporción relativa de iones de sodio (Can, 2011).

Eaton (1950), propuso los siguientes parámetros de evaluación de las aguas de riego ricas en iones bicarbonato:

1. Porcentaje de sodio encontrado

$$= \frac{Na^+}{Ca^{2+}Mg^{2+}Na^+} * 100$$

2. Porcentaje de sodio posible

$$= \frac{Na^+}{Ca^{2+}Mg^{2+}Na^+} - (Co_3^{2-} + HCO_3^-)$$

3. Carbonato de Sodio Residual: CSR

$$= (Co_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^+ + Mg^{2+})$$

En estas relaciones, los constituyentes iónicos se expresan en  $mmol_c L^{-1}$ . El cálculo de los valores de estas ecuaciones incluye la presuposición de que los iones  $CO_3^{2-}$  y  $HCO_3^-$  son cuantitativamente precipitados en el suelo hasta el límite de las concentraciones presentes de calcio y de magnesio en las aguas de riego.

Con base en estos índices, se puede concluir que las aguas con más de  $2.5 mmol_c L^{-1}$  de CSR no son buenas para el riego; aguas que contienen de  $1.25$  a  $2.5 mmol_c L^{-1}$  son dudosas; y aguas para riego que contienen menos de  $1.25 mmol_c L^{-1}$ , con toda seguridad son buenas.

Cuadro 3-4. Clasificación de las aguas para riego con base en el índice de carbonato de sodio residual (CSR)

Clase	CSR $mmol_c L^{-1}$
Buena	<1.25
Condicionada	1.25 – 2.5
No recomendable	>2.5

Se considera que, utilizando buenas prácticas de manejo de cultivos, y en combinación con la aplicación de mejoradores químicos, con éxito podrían ser utilizadas las aguas dudosas para el riego de cultivos (Oster y Rhoades, 1986). Estas conclusiones consideran que las aguas para riego se van a usar bajo condiciones medias con respecto a textura del suelo, velocidad de infiltración, capacidad de drenaje, lámina de riego a aplicar, el clima, y la tolerancia de los cultivos a las condiciones salinas de los suelos. Desviaciones considerables del valor medio de estas variables

puede hacer inseguro el uso de una determinada agua de riego que bajo condiciones medias sería de buena calidad o, al contrario.

### 3.11.2 Índice de salinidad

Algunos de los criterios para evaluar la salinidad del agua de riego son la CE y STD, Velázquez *et al.*, (2010) en su estudio, encontraron que la CE fue de 1 a 3 dS m<sup>-1</sup>. Por su parte, Rodríguez *et al.*, (2009) reportaron agua de salinidad media y muy alta. En este sentido, la CE (Cuadro 3-5) es uno de los criterios utilizados para la clasificación del agua.

Cuadro 3-5. Clasificación del agua de riego según la CE.

Clasificación	Criterio	CE (dS m <sup>-1</sup> )
C1	Salinidad baja	0 - 0.250
C2	Salinidad media	0.250 - 0.750
C3	Salinidad alta	0.750 - 2.250
C4	Altamente salina	> 2.250

Fuente: Richards *et al.*, 1954.

Con respecto a la salinidad, Ayers y Westcot (1987) indicaron que cuando el agua tiene una CE menor de 0.7 dS m<sup>-1</sup> no tiene restricción de uso, mientras que con una CE entre 0.7 y 3.0 dS m<sup>-1</sup> la restricción es moderada, y el uso es muy restringido con valores de CE mayores de 3.0 dS m<sup>-1</sup>, ya que se afecta la disponibilidad del agua para algunos cultivos. considerando que todas las aguas contienen sales, es importante desarrollar la investigación para conocer el tipo de agua según la concentración iónica que presente.

### 3.11.3 Índice de Salinidad Efectiva (SE)

Este índice, propuesto por Doneen (1958), es útil para estimar el peligro que pueden producir las sales más solubles del agua para riego al formar parte de la solución del suelo; esto puede entenderse mejor si se toma en cuenta que al ser sustraídos los carbonatos de calcio, carbonatos de magnesio, y sulfatos de calcio de la concentración total, cuando estos se precipitan en el momento en que el agua de riego pasa a formar parte de la solución del suelo y dejan de participar en el ascenso de la presión osmótica de la solución del suelo; pero es entonces cuando aumenta la concentración relativa de otras sales en la solución del suelo, sales que pueden causar problemas para los cultivos por cambios físico-químicos en el suelo.

El cálculo de este índice está condicionado a lo siguiente:

- I. Si  $Ca > (CO_3 + HCO_3 + SO_4)$ :  $SE = (\text{suma de cationes}) - (CO_3 + HCO_3 + SO_4)$
- II. Si  $Ca < (CO_3 + HCO_3 + SO_4)$ ; pero  $Ca > (CO_3 + HCO_3)$ :  $SE = (\text{suma de cationes}) - Ca$
- III. Si  $Ca < (CO_3 + HCO_3)$ ; pero  $(Ca + Mg) > (CO_3 + HCO_3)$ :  $SE = (\text{suma de cationes}) - (CO_3 + HCO_3)$
- IV. Si  $(Ca + Mg) < (CO_3 + HCO_3)$ :  $SE = (\text{suma de cationes}) - (Ca + Mg)$

En todas las anteriores expresiones los iones se expresan en  $mmol_c L^{-1}$ .

Cuadro 3-6. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo al índice de salinidad efectiva (SE).

<b>Clase</b>	<b>SE</b> $mmol_c l^{-1}$
<b>Buena</b>	<3
<b>Condicionada</b>	3 – 15
<b>No recomendable</b>	>15

Fuente: Doneen 1975.

### 3.11.4 Índice de Salinidad Potencial (SP)

Este índice fue propuesto por Doneen en 1975, el objetivo de este índice es evaluar el efecto de las sales solubles de  $Cl^-$ ,  $Na^+$  y  $MgSO_4$  cuando la humedad baja del 50% de la Humedad Aprovechable Residual (H.A.R.) y una alta concentración de estas sales en las aguas para riego puede causar daño a los cultivos, ya que esto da lugar a un incremento de la presión osmótica de la solución del suelo.

La expresión matemática utilizada para determinar la salinidad potencial es:

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

En esta expresión los iones se expresan en  $mmol_c L^{-1}$ .

Cuadro 3-7. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo al índice de salinidad Potencial (SP) y algunos parámetros del suelo

<b>Condición de suelo</b>	<b>Clase 1</b>	<b>Clase 2</b>	<b>Clase 3</b>
	<b>Buena</b>	<b>Condicionada</b>	<b>No recomendable</b>
A.- poco lavado por baja permeabilidad.	<3	3-5	>5
B.- lavado restrictivo, drenaje lento 10 y profundo.	<5	5-10	>10

Condición de suelo	Clase 1 Buena	Clase 2 Condicionada	Clase 3 No recomendable
C.- suelos profundos, percolación profunda y fácil.	15 <7	7-15	>15
C1.- suelos profundos, cultivos de tolerancia media.	30 <10	10-30	>30
C2.- suelos profundos, cultivos tolerantes de 35.	<15	15-35	>35

Fuente: Doneen 1975.

### 3.12 Peligro de salinidad (CE)

Richards (1973), establece la concentración total de sales solubles en las aguas para riego, para fines de diagnóstico y clasificación, se pueden expresar en términos de CE; con base en esto, las aguas para riego se han dividido en cuatro clases:

- *Aguas de baja salinidad (C1):*  $0 \text{ mS cm}^{-1} < \text{CE} < 0.25 \text{ mS cm}^{-1}$ , pueden usarse para riego en casi todos los cultivos y en casi todos los tipos de suelo, la salinización de los suelos es mínima. Pueden ser necesarios lavados de suelo después de practicar el riego durante mucho tiempo, pero eso solo si la permeabilidad de los terrenos es baja y los cultivos se ven afectados por la salinidad.
- *Aguas de salinidad media (C2):*  $0.25 \text{ mS cm}^{-1} < \text{CE} < 0.75 \text{ mS cm}^{-1}$ , pueden usarse siempre y cuando tengan un grado moderado de lavado de suelos. En casi todos los casos, y sin necesidad de prácticas especiales de control de la salinidad, estas aguas pueden usarse en la producción de plantas moderadamente tolerantes a las sales.
- *Aguas altamente salinas (C3):*  $0.75 \text{ mS cm}^{-1} < \text{CE} < 2.25 \text{ mS cm}^{-1}$ , no es conveniente usarlas para riego en suelos cuyo drenaje sea deficiente, y aun con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales para el control de la salinidad, además de que es necesario que las plantas a regar con estas aguas sean muy tolerantes a la salinidad.
- *Aguas muy altamente salinas (C4):*  $\text{CE} > 2.25 \text{ mS cm}^{-1}$ , no son apropiadas para riego bajo condiciones ordinarias, pero pueden usarse ocasionalmente en circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado, debiendo aplicarse un exceso de agua para lograr un buen lavado, también es muy importante que los cultivos a regar con estas aguas sean altamente tolerantes a las sales.

Las aguas cuya  $CE \leq 0.75 \text{ mS cm}^{-1}$  son satisfactorias en cuanto a concentración de sales, aun cuando los cultivos sensibles pueden ser afectados de manera adversa cuando se usan aguas que presenten  $0.25 \text{ mS cm}^{-1}$ .

Las aguas con  $0.75 \text{ mS cm}^{-1} < CE \leq 2.25 \text{ mS cm}^{-1}$  son comúnmente utilizadas, obteniéndose un buen crecimiento de las plantas, siempre y cuando se haga un buen manejo del suelo y se cuente con drenaje eficiente (Richards, 1973).

El empleo de aguas con  $CE > 2.25 \text{ mS cm}^{-1}$  es una excepción, y en escasas ocasiones se obtienen buenos resultados en las cosechas de los cultivos irrigados con este tipo de aguas.

### **3.13 Peligro de Sodicidad (RAS).**

La clasificación de las aguas para riego, de acuerdo con sus contenidos de sodio, se ha hecho con la intención de prever el efecto del ion sodio sobre los sistemas coloidales de los suelos, además de entender los problemas físico-químicos que se derivan de tener altas cantidades de sodio intercambiable en los suelos. Se sabe que los suelos que tienen altas cantidades de sodio intercambiable poseen un  $pH > 8.4$ , alta dispersión de los coloides orgánicos e inorgánicos, y altos contenidos de carbonatos y bicarbonatos de sodio (Antipov-Karataev, 1967).

Un parámetro muy importante, para clasificar las aguas en base a su contenido de sodio intercambiable, es la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), la cual ha sufrido diferentes ajustes y se expresan matemáticamente de las siguientes formas:

#### **3.13.1 Ecuación para el cálculo de la relación de adsorción de sodio original**

Como se ha mencionado, existe una relación de proporcionalidad entre los valores de los parámetros RAS y PSI en aguas de riego. Ya que 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 tanto, 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:

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

En donde  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  se refieren a las concentraciones de los cationes solubles expresados en  $mmol_c L^{-1}$ .

Esta 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  $Na^+$  = 16.2, para el  $Ca^{2+}$  = 16.7 y para el  $Mg^{2+}$  = 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  $Ca^{2+}$  y el  $Mg^{2+}$  tienen la misma selectividad de intercambio, que no es correcto; para un mismo RAS, la adsorción de  $Na^+$  crece al aumentar la relación  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  debido a la menor energía de enlace del  $Mg^{2+}$ . Por otra parte, no se consideran las variaciones de las concentraciones del ion  $Ca^{2+}$  debido a su precipitación en condiciones de alcalinidad elevada,  $pH > 8.2$ . Precipitación que se presenta para el  $Ca^{2+}$  en forma de  $CaCO_3$  y  $CaSO_4$ .

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

En 1968, Bower *et al.*, 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 ( $RAS_{aj}$ ).

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

Esta formulación toma en cuenta la formación de precipitados en forma de  $CaCO_3$  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  $CaCO_3$  (Bower y Maasland, 1963). El índice de saturación estima la precipitación del  $CaCO_3$  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 CaCO<sub>3</sub> (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 CO<sub>2</sub>) precipitando o diluyendo CaCO<sub>3</sub>. El índice de saturación se calcula como sigue:

$$IS = (8.4 - pHc)$$

Valores positivos de este índice indican que el CaCO<sub>3</sub> precipitará del agua, mientras que valores negativos indican que el agua solubilizará CaCO<sub>3</sub>. La ecuación de Langelier para el cálculo del pHc es:

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

En donde:

pK<sub>2</sub>' = Es el logaritmo negativo de la segunda constante de disociación del ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), corregido por la fuerza iónica.

pK<sub>c</sub>' = Es el producto de solubilidad del CaCO<sub>3</sub>, corregido por la fuerza iónica.

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

p(Alk) = Corresponde al logaritmo negativo de la concentración equivalente de la base titulable de CO<sub>3</sub> y HCO<sub>3</sub>.

Los valores de pK<sub>2</sub>'-pK<sub>c</sub>' 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<sub>2</sub>' y pK<sub>c</sub>', usando K<sub>2</sub> = 4.7 x 10<sup>-11</sup> y K<sub>c</sub> = 5.0 x 10<sup>-9</sup> 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 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>.

Esta formulación de RAS no toma en cuenta la posible precipitación del sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) y además hace equivalentes, en sus propiedades físico-químicas a los iones Ca y Mg.

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

Suárez (1981), recomienda un nuevo procedimiento para el cálculo de la relación de adsorción de sodio, la RAS corregida ( $\text{RAS}^\circ$ ); que conjuntamente con el valor de  $\text{Ca}^\circ$  ofrece una mejor comprensión de las modificaciones del calcio en la solución del suelo, que dan 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 ( $\text{CO}_2$ ), del ion bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) 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 ( $\text{CaCO}_3$ ) u otros minerales como los silicatos y la inexistencia de precipitación del magnesio. La  $\text{RAS}^\circ$  puede calcularse mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

$\text{RAS}^\circ$  = Relación de Adsorción de Sodio Corregida

Na = Contenido de sodio en el agua de riego,  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$

$\text{Ca}^\circ$  = Contenido corregido de calcio en el agua de riego,  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$

Mg = Contenido de magnesio en el agua de riego,  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$

El valor de  $\text{Ca}^\circ$  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 ( $\text{HCO}_3^- / \text{Ca}^{2+}$ ) y por la presión parcial del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) ejercida en los primeros milímetros del suelo ( $P = 0.0007 \text{ atm}$ ). Cada uno de los valores del Cuadro 3-8, 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 ( $\text{HCO}_3^- / \text{Ca}^{2+}$ ).

Cuadro 3-8. Concentración de  $\text{Ca}^\circ$  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<sup>1,2,3</sup>

		Salinidad del agua aplicada (CEa) en $\mu\text{S cm}^{-1}$											
		100	200	300	500	700	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000
Valor de $\text{HCO}_3^-$ $\text{Ca}^{2+}$ ( $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$ )	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	3.06	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	2.96	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
	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
	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. Fuente: Suárez, 1981.

2. Supone: a) una fuente de calcio proveniente de silicatos o caliza ( $\text{CaCO}_3$ ). b) no existe precipitación del magnesio. c) la presión relativa del  $\text{CO}_2$  de la superficie del suelo es igual a 0.0007 atm.

3.  $\text{Ca}^\circ$  y  $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$  están expresadas en  $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$ .

### 3.14 Clasificación de aguas con base en el RAS

La subdivisión de las aguas de riego, con respecto a la RAS, se basa esencialmente en el efecto que tiene el sodio intercambiable sobre las condiciones físicas de los suelos. Sin embargo, puede darse el caso de que, aunque los contenidos de sodio intercambiable no afecten las condiciones físicas de los suelos, las plantas sensibles a este elemento pueden sufrir daños a consecuencia de la acumulación del sodio en sus tejidos (Richards, 1973):

- **Aguas bajas en sodio (S1):** Aguas con bajo contenido en sodio, son aguas que pueden usarse para el riego en la mayoría de los suelos y dar como resultado pocas probabilidades de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. Pero cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.
- **Aguas medias en sodio (S2):** Aguas con contenido medio en sodio, estas aguas solo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad.
- **Aguas altas en sodio (S3):** Aguas con contenido alto en sodio, pueden provocar niveles altos de sodio intercambiable casi en todos los tipos de suelo, por tal razón será necesario prácticas especiales de manejo, buen drenaje, facilidad de lavado del suelo e incorporaciones adicionales de materia orgánica. El riego con estas aguas, sobre suelos con alto contenido de yeso, difícilmente dará lugar al desarrollo de niveles perjudiciales de sodio intercambiable.
- **Aguas muy altas en sodio (S4):** Aguas con contenido muy alto de sodio, esta agua es inadecuada para el riego de cultivos agrícolas, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio de los suelos y la aplicación de yeso u otros mejoradores en combinación con el uso de este tipo de aguas permite que aun siga siendo rentable el cultivo que se esté manejando.

El riesgo de sodificación de los suelos irrigados depende principalmente de la concentración absoluta y relativa en que se encuentren en el agua de riego los iones de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$ . Si la proporción de  $\text{Na}^+$  es alta, será mayor el riesgo de sodificación, y, al contrario, si predomina el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$ , el riesgo de sodificación es menor (Bower y Wilcox, 1965).

El diagrama para la clasificación de las aguas para riego está basado en la CE y en la RAS. Las tres curvas que aparecen en la Figura 3-2, se construyen a partir de las ecuaciones:

- Curva superior:  $\theta = 18.87 - 4.44 (\log C)$
- Curva intermedia:  $\theta = 31.31 - 6.66 (\log C)$
- Curva inferior:  $\theta = 43.75 - 8.87 (\log C)$

**Dónde:**

$$S = \text{RAS } C = \text{CE en mS cm}^{-1}$$

Estas son las ecuaciones empíricas de la ley de acción de masas entre los cationes solubles y los intercambiables, y delimitan las diferentes clases de sodio.

Los constituyentes inorgánicos solubles en forma iónica de las aguas para riego reaccionan con los suelos, y los principales cationes son:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ , y pequeñas cantidades de  $\text{K}^+$ ; en tanto que los aniones principales son:  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , y en menor cantidad  $\text{NO}_3^-$ .

La clasificación de aguas para riego agrícola se puede graficar con base en el siguiente diagrama realizado por Richards (1973), como se observa en la Figura 3-2, la clasificación de las aguas se relaciona con la CE (Peligro de salinidad) y la relación de adsorción sodio (peligro de alcalinidad).

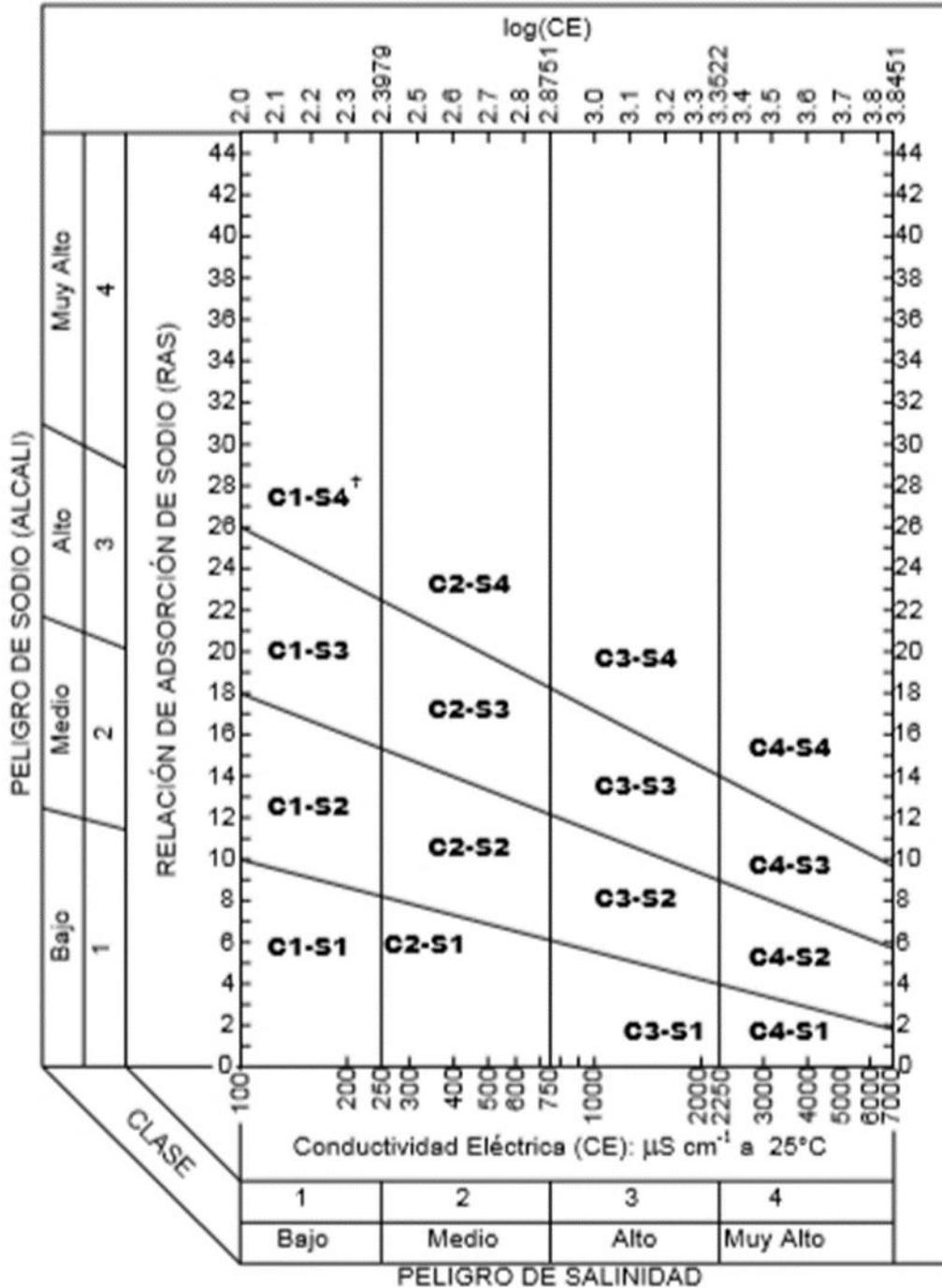


Figura 3-2. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego agrícola

Fuente: Richards, 1973.

### 3.14.1 Ecuación para el cálculo del porcentaje de sodio intercambiable

Como se ha mencionado 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:

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

Esta es 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 (1990), propone una ecuación para calcular el PSI mediante coeficientes gráficos, obtenidos al relacionar el PSI con la RAS.

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

Esta ecuación empírica se basa en que una vez determinada la RAS de un 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.

Seilsepour *et al.*, (2009), mencionan que el coeficiente de Richards es aplicable sólo para ciertas características de algunos suelos (suelos de zonas áridas) por ello realiza un estudio para obtener coeficientes aplicables para una zona de estudio en particular y con el propósito de ahorrar el cálculo de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en laboratorio. La ecuación que obtuvo fue:

$$PSI = 1.95 + 1.03 SAR$$

La primera ecuación planteada en este capítulo, para el cálculo del PSI, es la que con mayor frecuencia se utiliza, sin embargo, requiere el conocimiento del valor del coeficiente de selectividad iónica (K). El coeficiente de selectividad iónica se asume como constante, para cada suelo en particular (Velázquez *et al.*, 2002). Para tener un valor de K con una confiabilidad aceptable es necesario evaluar este coeficiente experimentalmente, en los suelos en los que se requiere estimar con precisión los niveles de sodio intercambiable, cuando estos suelos se riegan con un agua determinada. Las variaciones de K dependen de la mineralogía de los cristales arcillosos y de los grupos funcionales de las moléculas orgánicas.

Velázquez *et al.*, (2002) citan los coeficientes aplicables para cada suelo en particular. Para un suelo migajón-arcilloso-arenoso  $K = 0.00724$ , para un migajónarenoso-arcilloso  $K = 0.01000$ , para un migajón-arcilloso  $K = 0.01152$ , para un suelo arcilloso-limoso  $K = 0.01186$ , para un suelo rojo arcilloso  $K = 0.01401$ , para un suelo chernozem Tulskiy  $K = 0.01518$ , para diferentes suelos de California, EE. UU.,  $K = 0.01475$  y para un suelo arcilloso  $K = 0.01690$ . Estos valores tienen una dependencia debido a los procesos de montmorillonización, es decir, a las variaciones de las cargas negativas en los suelos, ocasionados por los procesos de alcalinización.

Los procesos de hidrolización de los iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  son los responsables de una alta alcalinidad, ya que el reblandecimiento de los sistemas coloidales arcillosos de los suelos es permanente, debido a la solubilización de los iones de silicio  $\text{Si}^{4+}$  en álcalis. Con la rotura de los enlaces se tiene un aumento de cargas negativas ( $\sum n$ ).

Por consiguiente, la topografía de los sistemas coloidales de los suelos es modificada fuertemente. De ahí que la constante de equilibrio químico o coeficiente de selectividad iónica adquiera diferentes valores.

Un mismo valor de la RAS de las aguas superficiales y subterráneas para riego agrícola que están interactuando con los diferentes sistemas coloidales de los distintos suelos, tendrá diferentes valores de sodio intercambiable expresados a través del PSI. Esto, se debe fundamentalmente a los diferentes valores del coeficiente de selectividad iónica, es decir, se debe a diferentes características topográficas de los sistemas coloidales de los suelos. En otras palabras, el coeficiente de selectividad iónica  $K (\text{mmol}_c \text{L}^{-1})^{-1/2}$ , depende de la localización y tipo de centros activos de intercambio catiónico en los suelos (Velázquez *et al.*, 2002).

El objetivo de contar con distintos valores de la relación de adsorción de sodio (RAS) consiste en tener la posibilidad de estimar los valores máximos y mínimos del porcentaje de sodio intercambiable en los suelos ( $PSI_{max}-PSI_{min}$ ). La estimación del RAS bajo diferentes conceptualizaciones prevé las variaciones de las concentraciones de los iones de  $Ca^{2+}$ . Es entonces así, por lo tanto, que, si consideramos que se cuenta con una amplitud de valores máximos y mínimos del RAS, de las diferentes soluciones y aguas que atraviesan los espesores superficiales de los suelos se podrán estimar entonces los diferentes niveles de sodio intercambiable que adquirirán los suelos cuando se riegan con aguas de diferente RAS. El conocimiento de la amplitud de valores del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) permite a los profesionales del mejoramiento de suelos salinos y sódicos establecer dosis correctas y óptimas de fuentes iones de calcio ( $Ca^{2+}$ ) para restablecer las propiedades físico-químicas de los suelos.

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

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 ion sodio.

Con respecto 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  $200 \mu S cm^{-1}$ ) 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). Las aguas de alta concentración iónica y con predominio del ion sodio también provocan problemas de infiltración. Fine *et al.*, (1959), mencionan que la infiltración aumenta con la salinidad y disminuye con una reducción en salinidad o aumenta cuando hay un incremento en el contenido de sodio en relación al calcio y magnesio (RAS).

Después de un 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 3-3).

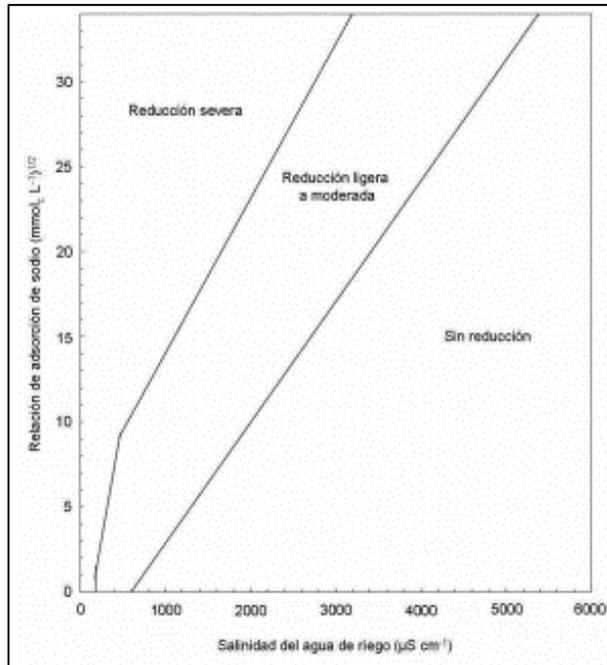


Figura 3-3. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio. Fuente: Oster y Schroer, (1979).

En conclusión, cuando los cultivos son regados con aguas de alto contenido de sodio, este elemento se acumula en los primeros centímetros de profundidad (Can, 2011)

Consecuentemente, los agregados de esta capa superficial se dispersan en partículas mucho más pequeñas que opturan los poros del suelo (Oster y Schroer, 1979). Este problema también puede ser provocado por un contenido de calcio extremadamente bajo. En algunos casos, las aguas con bajo contenido de sales originan el mismo problema, pero más bien como resultado de su naturaleza corrosiva y no al contenido de sodio en el agua, o en el suelo. Estas aguas de baja concentración de sales, disuelven y trasladan a mayores profundidades los minerales solubles, incluyendo al calcio.

### 3.16 Clasificación hidrogeoquímica del agua

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, el más usual es el diagrama de Piper (1944). Para ello 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  $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$ . Los iones representados en este diagrama son: aniones;  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  y cationes;  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ .

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 3-4):

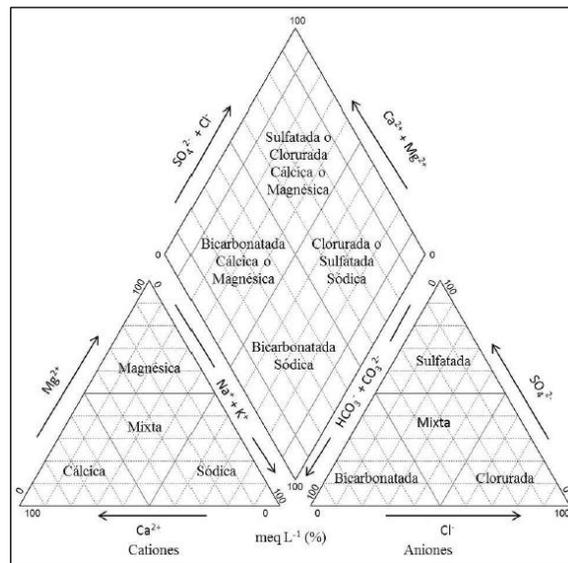


Figura 3-4. Sistema de clasificación hidrogeoquímica de aguas naturales usando el diagrama trilineal de Piper

La clasificación de los tipos de agua, según su posición en el sistema triangular, será como sigue:

1. Aguas sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas.
2. Aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas.
3. Aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas.
4. Aguas bicarbonatadas sódicas.
5. Aguas magnésicas.

6. Aguas cálcicas.
7. Aguas sódicas.
8. Aguas magnésicas, cálcicas y sódicas.
9. Aguas sulfatadas.
10. Aguas bicarbonatadas.
11. Aguas cloruradas.
12. Aguas sulfatadas, bicarbonatadas y cloruradas.

El campo central en forma de diamante es usado para representar las otras características de las aguas por un tercer punto gráfico, que es dado por la intersección de líneas proyectadas a partir de los puntos de las gráficas de cationes y aniones. Esta graficación en el campo central puede ser tomada también directamente de los datos analíticos, de acuerdo a la representación de los vectores de los márgenes del campo.

Las tres gráficas trilineales graficadas describen la representación esencial del carácter químico del agua, de acuerdo a la concentración relativa de los constituyentes.

### **3.17 Índices de toxicidad**

Los problemas de toxicidad surgen cuando ciertos iones del suelo o del agua son absorbidos por los cultivos y acumulados en sus tejidos en concentraciones suficientemente altas como para provocar daños y reducir sus rendimientos (Ayers y Westcot, 1987).

La magnitud de estos daños dependerá de la cantidad de iones absorbidos y de la sensibilidad de los cultivos; en este sentido, los iones de mayor importancia relacionados con la toxicidad son el cloruro, el boro y el sodio. Una vez absorbidos los iones, son transportados a las diferentes partes de la planta, y durante la transpiración se acumulan en las hojas.

Los cultivos sensibles resultan afectados por concentraciones de nitrógeno superiores a 5 mg L<sup>-1</sup>. El boro es esencial en cantidades relativamente bajas y la toxicidad, en algunos cultivos, se presenta cuando hay concentraciones de 1 a 2 mg L<sup>-1</sup>, lo cual se refleja en los rendimientos. La toxicidad más frecuente es la provocada por el Cl<sup>-</sup> contenido en el agua de riego debido a que este ion no es retenido por las partículas del suelo, por lo que es fácilmente absorbido por las raíces y trasladado a las partes de la planta (Ayers y Westcot, 1987).

## 4 MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Zona de estudio

#### 4.1.1 Ubicación General

La presente investigación se realizó en los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz, principalmente en almacenamientos de agua superficial, pozos y ríos. Se identificó mediante microcuencas y por Estado, las cuales se mencionan a continuación:

**Puebla;** 14 microcuencas muestreadas (Ver Cuadro 4-1).

Cuadro 4-1. Microcuencas muestreadas del estado de Puebla

<b>Microcuenca</b>	<b>Municipio</b>
<b>Azumbilla</b>	Nicolás Bravo (Pue)
<b>Guadalupe Victoria</b>	Guadalupe Victoria (Pue)
<b>Heroica Puebla De Zaragoza</b>	Puebla (Pue)
<b>La Cabaña</b>	Guadalupe Victoria (Pue)
<b>Los Humeros</b>	Chignautla (Pue)
<b>Molcaxac</b>	Molcaxac (Pue)
<b>San Antonio Texcala</b>	Tehuacán (Pue)
<b>San Matías Tlalancaleca</b>	Tlahuapán (Pue)
<b>San Pedro Zacachimalpa</b>	Cuautinchan (Pue)
<b>Santa Cruz Alpuyeca</b>	Cuautinchan (Pue)
<b>Tepeji De Rodríguez</b>	Tepeji De Rodríguez (Pue)
<b>Tequixquitla</b>	San Salvador El Seco (Pue)
<b>Tequixquitla 1</b>	San Nicolás Buenos Aires (Pue)
<b>Zapotitlán Salinas</b>	Zapotitlán (Pue)

**Fuente:** Modelo Digital de Elevaciones 3.0, INEGI 2007.

La localización espacial de las catorce microcuencas muestreadas se observa de la siguiente manera dentro del estado de Puebla (Figura 4-1).

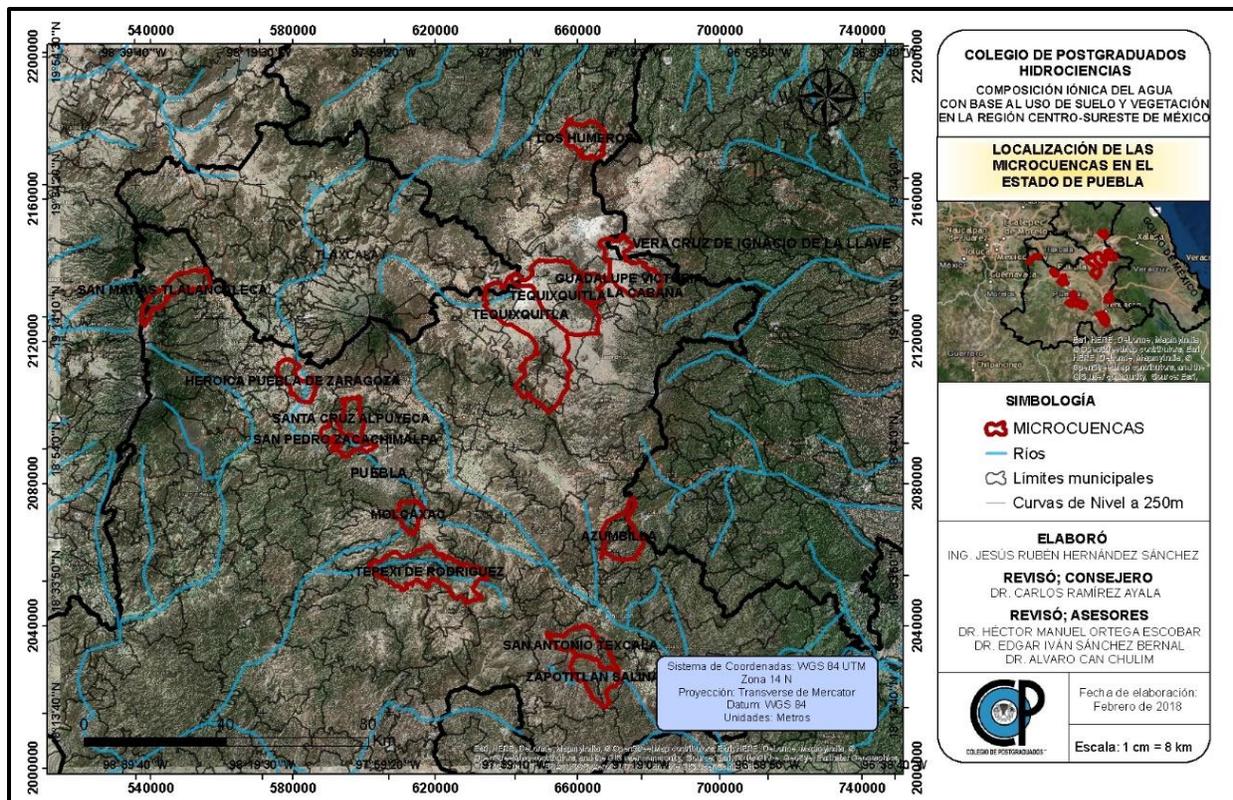


Figura 4-1. Localización espacial de las Microcuencas muestreadas del estado de Puebla.

**Fuente:** Modelo Digital de Elevaciones 3.0, INEGI 2007.

**Tlaxcala;** Para éste estado, solo tres microcuencas se muestrearon, de las cuales la microcuena Benito Juárez se localiza en parte del estado de Hidalgo (Cuadro 4-2).

Cuadro 4-2. Microcuencas muestreadas en el estado de Tlaxcala

Microcuena	Municipio
Atoyac F	Españita (Tla)
Benito Juárez	Apan (Hgo)
Ciudad de Nanacamilpa	Nanacamilpa de Mariano Arista (Tla)

**Fuente:** Modelo Digital de Elevaciones 3.0, INEGI 2007.

La localización espacial de las tres microcuencas muestreadas se observa de la siguiente manera dentro del estado de Tlaxcala (Figura 4-2).

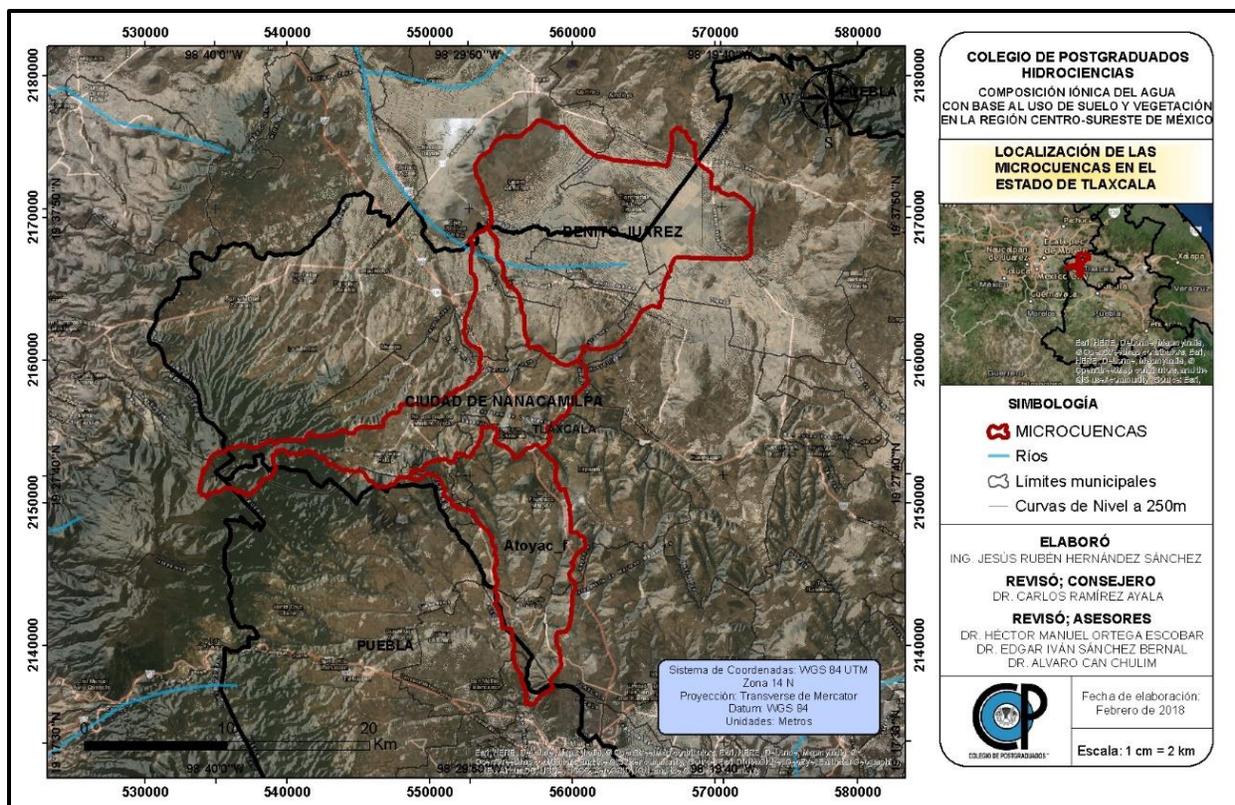


Figura 4-2. Localización espacial de las Microcuencas muestreadas del estado de Tlaxcala.

**Fuente:** Modelo Digital de Elevaciones 3.0, INEGI 2007.

**Veracruz;** nueve microcuencas muestreadas (Cuadro 4-3).

Cuadro 4-3. Microcuencas muestreadas del estado de Veracruz

Microcuenca	Municipio
Chavaxtla	Huatusco (Ver)
Ciudad Mendoza	Acultzingo (Ver)
General Miguel Alemán (Potrero Nuevo)	Amatlan de los Reyes (Ver)
Ixhuacán De Los Reyes	Ayahualulco (Ver)
Ixhuatlán Del Café	Calchualco (Ver)
Ixtaczoquitlan	Ixtaczoquitlan (Ver)
Nogales	Nogales (Ver)
Palmira	Ixtaczoquitlan (Ver)
San Marcos de León (San Marcos)	Xico (Ver)
Tlaltetela (Tlaltetela)	Tlaltetela (Ver)
Xalapa-Enríquez	Coatepec (Ver)
Xocotla	Coscomatepec (Ver)

**Fuente:** Modelo Digital de Elevaciones 3.0, INEGI 2007.

La localización y distribución espacial de las nueve microcuencas muestreadas se observa de la siguiente manera dentro del estado de Veracruz (Figura 4-3).

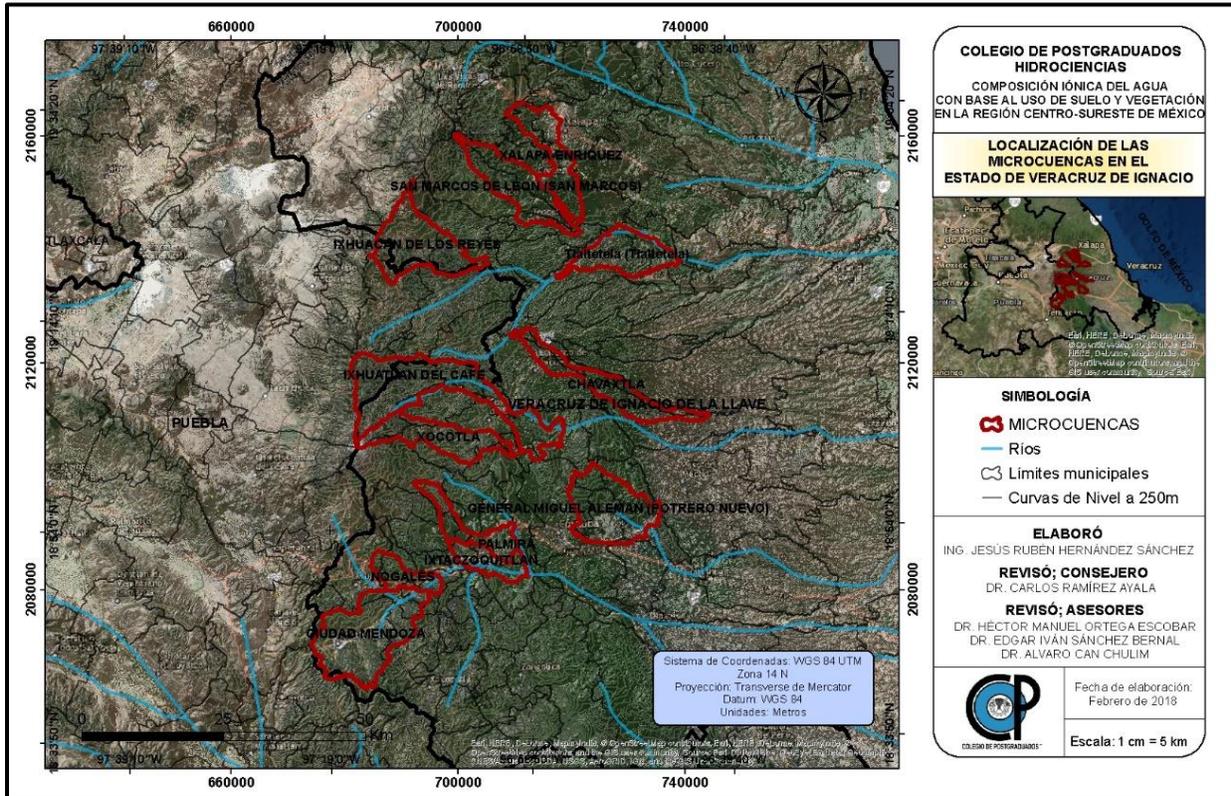


Figura 4-3. Localización y distribución espacial de las Microcuencas muestreadas del estado de Veracruz.

Fuente: Modelo Digital de Elevaciones 3.0, INEGI 2007.

#### 4.1.2 Descripción General de las Microcuencas

Se emplea la caracterización de las microcuencas por estado mediante procesos de información vectorial, con la finalidad de clasificar las muestras colectadas y profundizar en el origen de las sales que determinan el tipo de agua (ver Cuadros 4-4, 4-5 y 4-6).

Con ayuda de un Software de Información Geográfica, se realizó la caracterización para cada una de las microcuencas, ingresando datos vectoriales de Hidrología, Geología, Climatología, Uso de suelo y vegetación serie VI y edafología serié II de INEGI.

## Puebla

Cuadro 4-4. Caracterización de las microcuencas en Puebla

Microcuenca	Clima*	Hidrología			Geología		Vegetación Predominante	Suelo Predominante
		Subcuenca	Cuenca	Región	Era	Sistema		
Azumbilla	C(w1)	Papaloapan	Río Papaloapan	Papaloapan	Mesozoico	Cretácico	Matorral Desértico Rosetófilo	Luvisol Crómico
Guadalupe Victoria	BS1kw	Huamantla - San Diego Tepexmelucan	Río Atoyac-A	Balsas	Cenozoico	Cuaternario	Agricultura	Regosol Eutrico
Heroica Puebla de Zaragoza	C(w1)	Panzacola	Río Atoyac-A	Balsas	Cenozoico	Neógeno	Zona Urbana	Vertisol Pelico
La Cabaña	BS1kw	Huamantla - San Diego Tepexmelucan	Río Atoyac-A	Balsas	Cenozoico	Cuaternario	Bosque de Pino	Feozem Calcarico
Los Humeros	C(w2)	Huamantla - San Diego Tepexmelucan	Río Atoyac-A	Balsas	Cenozoico	Cuaternario	Pastizal	Regosol Eutrico
Molcaxac	C(wo)	Tlaltempan Catarina	Sta. Río Atoyac-A	Balsas	Mesozoico	Cretácico	Selva Baja Caducifolia	Cambisol Cálculo
San Antonio Texcala	BS1hw	Papaloapan	Río Papaloapan	Papaloapan	Cenozoico	Paleógeno	Matorral Desértico Rosetófilo	Litosol
San Matías Tlalancaleca	C(w2)	San Martinito	Río Atoyac-A	Balsas	Cenozoico	Neógeno	Agricultura de Riego Anual	Cambisol Eutrico
San Pedro Zacachimalpa	C(w1)	Balcon Diabla a Texaluca	Río Atoyac-A	Balsas	Cenozoico	Paleógeno	Pastizal	Cambisol Cálculo
Santa Cruz Alpuyecá	C(w1)	Tlaltempan Catarina	Sta. Río Atoyac-A	Balsas	Cenozoico	Neógeno	Pastizal	Feozem Haplico
Tepeji De Rodríguez	(A)C(wo)	Tlaltempan Catarina	Sta. Río Atoyac-A	Balsas	Mesozoico	Cretácico	Agricultura	Litosol
Tequixquitla	C(w1)	Huamantla - San Diego Tepexmelucan	Río Atoyac-A	Balsas	Cenozoico	Cuaternario	Agricultura	Solonchak Takirico
Tequixquitla 1	C(w1)	Huamantla - San Diego Tepexmelucan	Río Atoyac-A	Balsas	Cenozoico	Cuaternario	Agricultura	Regosol Eutrico
Zapotitlán Salinas	BS1hw	Papaloapan	Río Papaloapan	Papaloapan	Mesozoico	Cretácico	Matorral Crasicaule	Litosol

\*Con base en la clasificación climática de Köppen modificada por García (2004)

## **Clima**

**(A)C(wo):** Clima Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C, la precipitación del mes más seco es menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2, y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

**BS1hw:** Clima Semiárido, Semicálido, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C, presenta lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

**BS1kw:** Clima semiárido templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, la temperatura del mes más caliente es menor de 22°C, presenta lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

**C(w1):** Clima templado subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente 22°C, la precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

**C(w2):** Clima Templado subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C, la precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

**C(wo):** Clima templado subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. la precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de precipitación invernal del 5% al 10.2% del total anual.

## Tlaxcala

Cuadro 4-5. Caracterización de las microcuencas en Tlaxcala

Microcuenca	Clima*	Hidrología		Región	Geología		Vegetación Predominante	Suelo Predominante
		Subcuenca	Cuenca		Era	Sistema		
Atoyac F	C(w2)	San Martinito	Río Atoyac-A	Balsas	Cenozoico	Neógeno	Agricultura	Cambisol Eutrico
Benito Juárez	C(wo)	Pachuca - Cd. de México	Río Moctezuma	Pánuco	Cenozoico	Neógeno	Asentamientos Humanos	Feozem Haplico
Ciudad de Nanacamilpa	C(w2)	Pachuca - Cd. de México	Río Moctezuma	Pánuco	Cenozoico	Neógeno	Agricultura	Feozem Haplico

\*Con base en la clasificación climática de Köeppen modificada por García (2004)

### Clima

**C(w2):** Clima Templado subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C, la precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

**C(wo):** Clima templado subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. la precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de precipitación invernal del 5% al 10.2% del total anual.

## Veracruz

Cuadro 4-6. Caracterización de las microcuencas en Veracruz

Microcuenca	Clima*	Hidrología			Geología		Vegetación Predominante	Suelo Predominante
		Subcuenca	Cuenca	Región	Era	Sistema		
Chavaxtla	(A)C(m)(f)	Xicuintla - Jamapa	Río Jamapa y otros	Papaloapan	Mesozoico	Cretácico	Bosque Mesófilo de Montaña	Acrisol Ortico
Ciudad Mendoza	C(w1)	Papaloapan	Río Papaloapan	Papaloapan	Mesozoico	Cretácico	Agricultura	Vertisol Cromico
General Miguel Alemán (Potrero Nuevo)	Am	Santa Anita	Río Jamapa y otros	Papaloapan	Mesozoico	Cretácico	Agricultura	Litosol
xhuacan De Los Reyes	C(m)(f)	Pescados	Río Jamapa y otros	Papaloapan	Cenozoico	Cuaternario	Agricultura	Andosol Humico
Ixhuatlan Del Cafe	C(m)(f)	Xicuintla - Jamapa	Río Jamapa y otros	Papaloapan	Cenozoico	Cuaternario	Bosque Mesófilo de Montaña	Acrisol Ortico
Ixtaczoquitlan	(A)C(m)	Papaloapan	Río Papaloapan	Papaloapan	Cenozoico	Cuaternario	Zona Urbana	Rendzina
Nogales	C(w2)	Papaloapan	Río Papaloapan	Papaloapan	Mesozoico	Cretácico	Selva Alta Perennifolia	Vertisol Cromico
Palmira	(A)C(m)	Papaloapan	Río Papaloapan	Papaloapan	Cenozoico	Cuaternario	Agricultura	Litosol
San Marcos De Leon (San Marcos)	C(f)	Jalapa	Río Jamapa y otros	Papaloapan	Cenozoico	Cuaternario	Agricultura	Feozem Haplico
Tlaltetela (Tlaltetela)	(A)C(w2)	Jalapa	Río Jamapa y otros	Papaloapan	Cenozoico	Cuaternario	Agricultura	Vertisol Pelico
Xalapa-Enriquez	(A)C(fm)	Jalapa	Río Jamapa y otros	Papaloapan	Cenozoico	Cuaternario	Agricultura	Feozem Haplico
Xocotla	C(m)(f)	Atoyac	Río Jamapa y otros	Papaloapan	Cenozoico	Cuaternario	Bosque Mesófilo de Montaña	Andosol Humico

\*Con base en la clasificación climática de Köeppen modificada por García (2004)

## **Clima**

**(A)C(fm):** Clima Semicálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C, la precipitación del mes más seco mayor a 40 mm; lluvias entre verano e invierno y porcentaje de lluvia invernal menor al 18% del total anual.

**(A)C(m)(f):** Clima Semicálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C, con precipitación anual mayor de 500 mm y precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.

**(A)C(m):** Clima Semicálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C, presenta lluvias de verano, precipitación del mes más seco es mayor de 40 mm; porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

**(A)C(w2):** Clima Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C, la precipitación del mes más seco es menor a 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

**Am:** Clima Cálido húmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C, la precipitación del mes más seco es menor de 60 mm; lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal del 5% al 10.2% del total anual.

**C(f):** Clima Templado húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C, la precipitación en el mes más seco es mayor de 40 mm; lluvias todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.

**C(m)(f):** Clima Templado húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C, la precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.

**C(w1):** Clima templado subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente 22°C, la precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

**C(w2):** Clima Templado subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C, la precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

## 4.2 Muestreo

Para la colección de muestras, se realizó la metodología que establece Richards 1973, mismo que indica esta actividad como una operación que requiere mucha atención y cuidado, para que el agua a analizar no manifieste cambios químicos y biológicos o de contaminación en la composición del agua antes de su llegada al laboratorio.

La toma de muestras de agua se realizó en una sola recolección, en diversos puntos estratégicos de las microcuencas antes mencionadas, logrando obtener 97 estaciones de muestreo, clasificadas con base en el uso de suelo y vegetación correspondientes a la región centro-sureste de México, las clasificaciones se muestran a continuación:

- Clasificación agrícola; se obtuvo un total de 27 muestras dentro de la región centro-sureste de México.

Cuadro 4-7. Clasificación agrícola

Muestra	Clasificación agrícola		Coordenadas UTM	
	Tipo	Descripción	X	Y
1	Jagüey	Carretera Benito Juárez, Tlaxcala (cerca de la Hacienda).	554,070.80	2,165,082.04
2	Presa	San Miguel Arcángel (Zoqueapan)	554,799.14	2,165,867.36
3	Laguna	Laguna Azul, San Felipe Nanacamilpa	545,886.86	2,152,425.50
4	Presa	Pozuelos, Nanacamilpa	550,644.40	2,154,794.02
5	Nacimiento de Agua	Balneario el Hocual, Atotonilco	555,915.27	2,142,066.75
6	Río	Salida de Atotonilco	556,882.30	2,140,671.32
7	Presa	Chiautla Puebla	556,732.45	2,137,047.03

Clasificación agrícola			Coordenadas UTM	
Muestra	Tipo	Descripción	X	Y
8	Afluente	Atotonilco, Chiautla Puebla	556,621.47	2,136,615.04
9	Río	Atotonilco, Chiautla Puebla	556,531.04	2,135,815.12
10	Nacimiento	Manantial 1, Hacienda Chiautla	555,197.35	2,136,048.31
11	Nacimiento	Manantial 2, Hacienda Chiautla	555,217.87	2,136,105.11
12	Nacimiento	Manantial 3, Hacienda Chiautla	555,360.85	2,135,822.37
13	Laguna	Hacienda Chiautla	555,422.96	2,135,885.63
14	Río	Río Cuautinchan, Cuautinchan	598,832.46	2,092,643.73
15	Almacenamiento Superficial	Puerto del Aire, Puerto del Aire, Ver.	675,400.62	2,068,122.77
16	Nacimiento	Aculzingo Veracruz	685,291.10	2,073,835.08
17	Río	Río Blanco, Taza de Agua Ojos Zarcos, Nogales	689,048.42	2,077,468.80
18	Río	Río Metlac, Orizaba	709,346.33	2,090,538.85
19	Afluente	Afluente Río Blanco, Puente Vehicular San Miguel	709,703.00	2,091,052.00
20	Nacimiento	Río Atoyac, Córdoba	724,193.98	2,094,157.30
21	Río	Río Los Pescados, Puente Los Pescados, Jalcomulco	728,414.91	2,142,521.99
22	Río	Río s/n, Puente El Diablo, Xicotepec	719,244.76	2,150,281.07
23	Río	Río Teocelo, Xalapa	711,390.67	2,146,644.46
24	Afluente	Afluente Ixhuacán, San Isidro Ayahualulco	692,506.09	2,140,534.26
25	Laguna	Totolcingo, San Salvador el Seco	645,316.56	2,135,070.54
26	Manantial 1	El Carmen, El Carmen Tequexquitla	643,660.00	2,136,482.00
27	Manantial 2	El Carmen, El Carmen Tequexquitla	643,565.04	2,136,428.39

- Clasificación bosque mesófilo de montaña; se obtuvo un total de cuatro muestras dentro de la región centro-sureste de México.

Cuadro 4-8. Clasificación bosque mesófilo de montaña

Clasificación bosque mesófilo de montaña			Coordenadas UTM	
Muestra	Tipo	Descripción	X	Y
1	Laguna	Laguna de Nogales, Nogales	693,355.89	2,081,966.08
2	Río	Río Jamapa	707,574.00	2,105,695.00
3	Río	Puente Río Jamapa	706,851.00	2,113,051.00
4	Río	Río s/n, Puente Ruiz Cortines, Rancho Dos Puentes	714,541.61	2,122,527.78

- Clasificación lagos cráter; se obtuvo un total de seis muestras dentro del estado de Puebla.

Cuadro 4-9. Clasificación lagos cráter

Clasificación lagos cráter			Coordenadas UTM	
Muestra	Tipo	Descripción	X	Y
1	Lago Cráter	Alchichica, San José Alchichica	667,773.56	2,147,412.24
2	Lago Cráter	La Preciosa, Chichicuautila, Tepeyahualco	669,426.38	2,142,763.76
3	Lago Cráter	Quechulac, San Isidro Xaltepec	672,708.93	2,143,139.43
4	Lago Cráter	Atexcac, San Luis Atexcac	662,824.21	2,138,592.99
5	Lago Cráter	Aljojuca, San Juan Atenco	654,373.14	2,111,609.14
6	Lago Cráter	Tecuitlapa, San Miguel Tecuitlapa	653,161.05	2,115,309.01

- Clasificación Las Salinas Zapotitlán; se obtuvo un total de 47 muestras dentro de Zapotitlán Puebla.

Cuadro 4-10. Clasificación Las Salinas

Clasificación: Las Salinas Zapotitlán (Matorral)			Coordenadas UTM	
Muestra	Tipo	Descripción	X	Y
1	Pozo 1	Las Salinas Chica	663,765.00	2,029,253.00
2	Pozo 2	Las Salinas Chica	663,790.00	2,029,256.00
3	Pozo 3	Las Salinas Chica	663,836.00	2,029,248.00
4	Pozo 4	Las Salinas Chica	663,857.00	2,029,249.00
5	Pozo 5	Las Salinas Chica	663,869.00	2,029,247.00
6	Pozo 6	Las Salinas Chica	663,899.00	2,029,248.00
7	Pozo 7	Las Salinas Chica	663,909.00	2,029,230.00
8	Pozo 8	Las Salinas Chica	663,791.00	2,029,216.00
9	Pileta	Etapa Inicial, Las Salinas Chica	663,792.00	2,029,244.00
10	Pileta	Etapa Final, Las Salinas Chica	663,785.00	2,029,245.00
11	Pozo 1	Las Salinas Paraje Caracol	665,753.00	2,031,393.00
12	Pozo 2	Las Salinas Paraje Caracol	665,760.00	2,031,420.00
13	Pozo 3	Las Salinas Paraje Caracol	665,770.00	2,031,427.00
14	Pozo 4	Las Salinas Paraje Caracol	665,775.00	2,031,494.00
15	Pozo 5	Las Salinas Paraje Caracol	665,826.00	2,031,465.00
16	Pozo 1	Las Salinas Cecilio	665,872.00	2,031,417.00
17	Pozo 2	Las Salinas Cecilio	665,877.00	2,031,405.00
18	Pozo 3	Las Salinas Cecilio	665,883.00	2,031,394.00
19	Pozo 4	Las Salinas Cecilio	665,869.00	2,031,376.00
20	Pozo 1	Pozo el Grande. Las Salinas Hermanos Barragán Huerta	665,957.00	2,031,818.00
21	Pozo 2	Pozo el Colorado. Las Salinas Hermanos Barragán Huerta	665,977.00	2,031,783.00

<b>Clasificación: Las Salinas Zapotitlán (Matorral)</b>			<b>Coordenadas UTM</b>	
<b>Muestra</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descripción</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
22	Pozo 3	Pozo las Sábilas. Las Salinas Hermanos Barragán Huerta	665,961.00	2,031,774.00
23	Pozo 4	Pozo el Verde. Las Salinas Hermanos Barragán Huerta	665,918.00	2,031,869.00
24	Pozo 5	Pozo el Pacheco. Las Salinas Hermanos Barragán Huerta	665,947.00	2,031,896.00
25	Pozo 6	Pozo Brazo de Oro. Las Salinas Hermanos Barragán Huerta	665,885.00	2,031,915.00
26	Río	Río el Salado	666,009.00	2,032,217.00
27	Pozo 7	Pozo el General. Las Salinas Hermanos Barragán Huerta	665,996.00	2,032,207.00
28	Pozo 8	Pozo el Márquez. Las Salinas Hermanos Barragán Huerta	665,980.00	2,032,206.00
29	Pozo 1	Las Salinas José	665,962.00	2,032,193.00
30	Pozo 2	Las Salinas José	665,973.00	2,032,193.00
31	Pozo 3	Las Salinas José	665,990.00	2,032,183.00
32	Pozo 4	Las Salinas José	665,995.00	2,032,162.00
33	Pozo 5	Las Salinas José	665,997.00	2,032,149.00
34	Pozo 9	Pozo Lorenzo. Las Salinas Hermanos Barragán Huerta	666,012.00	2,031,872.00
35	Pozo 1	Las Balsas. Las Salinas Antelmo Barragán Ortiz	666,058.00	2,031,865.00
36	Pozo 2	Las Balsas. Las Salinas Antelmo Barragán Ortiz	666,045.00	2,031,865.00
37	Pozo 1	El Boquerón. Las Salinas Vicente Barragán	666,101.49	2,031,812.89
38	Pozo 2	El Boquerón. Las Salinas Vicente Barragán	666,114.00	2,031,764.00
39	Pozo 3	El Boquerón. Las Salinas Vicente Barragán	666,111.00	2,031,736.00
40	Pozo 1	Paraje el SauCE Las Salinas Vicente Barragán	663,615.00	2,026,594.00
41	Pozo 2	Paraje el SauCE Las Salinas Vicente Barragán	663,614.00	2,026,612.00
42	Pozo 3	Paraje el SauCE Las Salinas Vicente Barragán	663,674.00	2,026,606.00
43	Pozo 4	Paraje el SauCE Las Salinas Vicente Barragán	663,689.00	2,026,637.00
44	Pozo 1	Paraje Los Castillos. Las Salinas	665,580.93	2,026,655.60
45	Pozo 2	Paraje Los Castillos. Las Salinas	665,594.16	2,026,685.00
46	Pozo 3	Paraje Los Castillos. Las Salina	665,610.74	2,026,685.05
47	Río	Río Salado en Las Salinas	665,622.94	2,026,641.45

- Clasificación pastizal; se obtuvo un total de cuatro muestras dentro de la región centro-sureste de México.

Cuadro 4-11. Clasificación pastizal

Clasificación pastizal			Coordenadas UTM	
Muestra	Tipo	Descripción	X	Y
1	Presa	General Ávila Camacho, Valsequillo	593,858.68	2,091,252.95
2	Río	Río Ixhuacán, Ixhuacán de los Reyes	699,893.12	2,139,822.96
3	Pozo 1	Los Humeros Geotérmica, Lavaderos, Chignautla	661,938.16	2,177,585.43
4	Pozo 2	Los Humeros Geotérmica, Pileta de desagüe, Chignautla	660,568.00	2,178,196.07

- Clasificación zona urbana; se obtuvo un total de tres muestras dentro de la región centro-sureste de México.

Cuadro 4-12. Clasificación zona urbana

Clasificación zona urbana			Coordenadas UTM	
Muestra	Tipo	Descripción	X	Y
1	Almacenamiento Superficial	Comunidad Francisco Villa	556,180.29	2,165,482.18
2	Río	Río Atoyac, Ciudad de Puebla	579,750.17	2,108,609.17
3	Río	Río Xico, Xicotepéc	713,720.37	2,149,310.57

- Clasificación selva baja; se obtuvo un total de seis muestras dentro de la región centro-sureste de México.

Cuadro 4-13. Clasificación selva baja

Clasificación selva baja			Coordenadas UTM	
Muestra	Tipo	Descripción	X	Y
1	Río	Puente de Dios, Molcaxac	613178.57	2071707.19
2	Nacimiento	Entrada Puente de Dios, Molcaxac	613271.40	2071744.23
3	Nacimiento	Balsa de los Pescaditos, Molcaxac	611221.83	2070482.77
4	Río	Río Axamilma, Axamilma	612725.29	2057977.09
5	Río	Río Blanco, Comunidad Río Blanco, Nogales	694911.34	2082963.88
6	Nacimiento	Ojo de Agua, Orizaba	702631.57	2086826.70

La forma de obtención de la muestra fue en contenedores nuevos esterilizados de plástico con capacidad de 0.5 L, tomando dos muestras por sitio. Se realizó la medida de temperatura del agua al instante, cada muestra se etiquetó con la fecha de recolección, la ubicación geográfica y localización, el nombre de la estación de muestreo y características particulares del sitio y de la muestra, posteriormente fueron trasladadas al laboratorio de Ciencias Ambientales del postgrado de Hidrociencias en el Colegio de Postgraduados para su análisis. En la Figura 4-4 se muestra la distribución espacial de las 97 muestras colectadas clasificadas con base en el uso de suelo y vegetación.

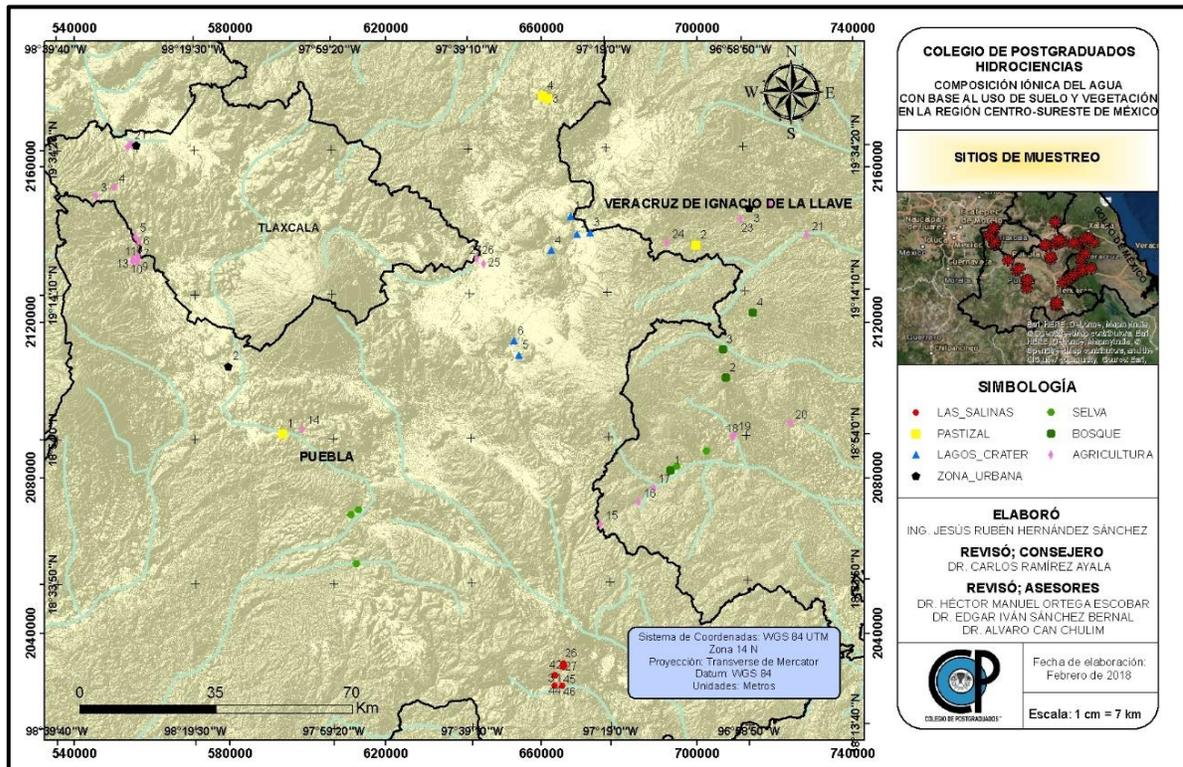


Figura 4-4. Distribución espacial des 97 muestras colectadas clasificadas con base en el uso de suelo y vegetación

### 4.3 Análisis de agua

Para la determinación de los parámetros físico-químicos de cada una de las aguas, se emplearon los siguientes métodos analíticos, ver Cuadro 4-14.

Cuadro 4-14 Métodos analíticos empleados en la determinación físico-química de aguas

Determinación	Método	Referencia
pH	Potenciómetro marca Beckman, modelo Hoffmann Pinther Bosworth.	Eaton et. al., 1995
Conductividad eléctrica	Conductimetría, mediante Conductímetro con puente Wheastone con celda de vidrio.	Richards, 1990
Residuo seco evaporado	Gravimetría mediante estufa marca Hot-Plate modelo 2200 Thermolyne.	Eaton et. al., 1995
Carbonatos	Volumétrico. Mediante titulación con ácido sulfúrico 0.01N y 0.05 N, indicador fenolftaleína.	APHA, 1995 2320 B
Bicarbonatos	Volumétrico. Mediante titulación con ácido sulfúrico 0.01N y 0.05 N, indicador anaranjado de metilo.	APHA, 1995 2320
Cloruros	Método Mhor. Mediante titulación con nitrato de plata 0.01N. y cromato de potasio al 5% como indicador.	APHA, 1995 3500 Ca <sup>2+</sup> , D
Calcio y Magnesio	Volumétrico. Mediante titulación con EDTA 0.01N. Indicador Ericromo Negro T como indicador, para Ca <sup>2+</sup> + Mg y Murexida para Ca <sup>2+</sup>	APHA, 1995 4500-D-IB
Sodio y Potasio	Flamometría. Flamómetro marca IL Autocal Flame Photometer 643, $\lambda=589$ nm, calibrado con soluciones estándar de 140 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> para Na <sup>2+</sup> y de 5 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> para K <sup>+</sup> .	APHA, 1995 3500- Na <sup>2+</sup> y K <sup>+</sup> . D
Sulfatos	Turbidimetría. Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35, $\lambda=420$ nm.	APHA, 1995 4500-SO42—E
Fosforo de los fosfatos	Espectrofotometría, mediante el Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35, $\lambda=690$ nm	Rodier (1978)
Boro	Turbidimetría. Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35, $\lambda=420$ nm., Azomethina-H	Rodier (1978); Page, 1982; Rhoades <i>et al.</i> , 1970
Nitrógeno de los Nitratos	Nitración, ácido Salicílico mediante Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35, $\lambda=410$ nm	Robarge <i>et al.</i> , 1933

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

#### 4.4.1 Balance de cationes y aniones

El balance de iones positivos y negativos es un método de comprobación recomendado por APHA (1995), el cual se basa en que la suma de aniones y cationes, expresados en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, deberán estar equilibrados, porque todas las aguas son eléctricamente neutras; es decir, la suma de

aniones debe ser similar a la suma de cationes. Esta similitud se calcula con el porcentaje de diferencia, definido como sigue:

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

Los criterios de aceptación de los porcentajes se presentan en el Cuadro 4-15.

Cuadro 4-15. Criterios de aceptación del balance anión-catión.

Suma de aniones (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	% de diferencia aceptable
0.0-3.0	±0.20
3.0-10.0	±2.00
10.0-800.0	±2.00-5.00

Fuente: APHA 1995.

#### 4.4.2 Conductividad eléctrica

La obtención de la CE en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , es el segundo método de comprobación recomendado por APHA (1995), el cual establece la igualdad en el valor obtenido comparado con el valor estimado. Si la CE calculada es mayor que la medida, se deberá analizar de nuevo la suma mayor de iones. El rango aceptable es el siguiente:

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

#### 4.4.3 Sólidos totales disueltos

Para considerar que un análisis de agua es correcto, se deberán obtener los sólidos totales disueltos (STD) medidos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) y deberán ser significativamente iguales a los sólidos totales calculados, el rango de variación de los resultados se deberá encontrar entre los siguientes valores:

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

La concentración total de sólidos totales disueltos medidos, deberá ser mayor al calculado. 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% calculado, la suma menor de iones y sus constituyentes seleccionados deben ser analizados nuevamente.

#### 4.4.4 Conductividad eléctrica 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 CE expresada en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , para diferentes tipos de salinidad el valor se encuentra entre los siguientes intervalos:

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

Dónde: Las concentraciones de cationes o aniones están expresadas en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ , y la CE en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . La suma de aniones o de aniones debe ser 1/100 del valor de la CE medida.

#### 4.4.5 Sólidos totales disueltos medidos a un rango de conductividad eléctrica

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

#### 4.4.6 Análisis estadístico

Con base en las obras de Infante Gil y Zarate de Lara (2012), se realizaron análisis de correlación y posteriormente análisis de regresión con un modelo lineal sin el término constante para establecer algunas relaciones entre las variables observadas, tales como CE, STD, suma de cationes, suma de aniones, pH,  $\text{RAS}^\circ$  y  $\text{RAS}_{aj}$ .

El coeficiente de correlación ( $r_{xy}$ ) se determinó como indicador de la asociación entre las variables medidas, del cual se puede establecer lo siguiente: a medida que  $r_{xy}$  se aproxima a 1 o -1, existirá mayor evidencia de que en el modelo de regresión lineal simple, la variable X contribuye significativamente a explicar la variable Y.

Si  $r_{xy}$  tiene un valor cercano a cero no hay razón para creer que existe una relación de tipo lineal entre las variables (X, Y). Por lo tanto,  $r_{xy}$  y  $R^2_{xy}$  son únicamente indicadores de tipo descriptivo. Los valores positivos del coeficiente de correlación indican que las variables tienden a crecer o decrecer simultáneamente; los valores negativos indican que si una variable aumenta la otra disminuye. Los valores -1 y 1 se alcanzan cuando los valores de (X, Y) se encuentran sobre una línea recta.

El objetivo de realizar el análisis de regresión en este trabajo, fue para comparar los valores de estimación de las variables:  $\text{CE} \times 10 = \text{suma de cationes}$ ,  $\text{CE} \times 640 = \text{suma de iones}$ ,  $\text{CE} = \text{suma de cationes} / 12$ ,  $\text{CE} \times 800 = \text{suma de iones}$ ; para ello se elaboraron diagramas de dispersión de estas variables y, posteriormente, el análisis de regresión con un modelo lineal.

Para realizar el análisis de la regresión lineal simple sin el término constante, como condición, debe ser posible que X tome el valor de cero, por tal razón, en este estudio, el modelo de regresión que mejor describió la relación entre las variables fue el siguiente:

$$Y = \beta_1 X$$

Dónde:

Y: es la variable dependiente.

$\beta_1$ : es el coeficiente de regresión estimado, mide el número de unidades que cambia Y por cada unidad de cambio en X.

X: es la variable independiente.

En este caso  $\beta_1$  se obtuvo mediante la siguiente expresión matemática:

$$\frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i}{\sum_{i=1}^n X_i^2}$$

## 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvo la composición iónica y la concentración total electrolítica de las diferentes aguas muestreadas en los Estados de la región centro-sureste de México clasificadas con base en el uso de suelo y vegetación, se describen desde la perspectiva de la calidad de agua para su uso agrícola. La discusión de los 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.

### 5.1 Concentración iónica de las muestras

Con la finalidad de identificar variaciones entre cada muestra, se presentan las concentraciones iónicas clasificadas con base en el uso de suelo y vegetación. Se observan muestras sin presencia de  $\text{CO}_3^{2-}$ , como lo indican Richards *et al.*, (1954), que cuando el pH sea menor a 8.2, no habrá presencia de  $\text{CO}_3^{2-}$ . Esto se debe principalmente a que el origen del agua no proviene del lavado de rocas calizas, así, parte del  $\text{CO}_3^{2-}$  que contienen estas rocas pasa el agua generando condiciones de alcalinidad. Para el caso de las salinas y los lagos cráter el resultado coincide con Juárez (2015), quien indica que las aguas en contacto con rocas evaporitas contienen concentraciones elevadas de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ .

El resultado de las concentraciones iónicas de las muestras analizadas, comparte similitud con la investigación realizada por Santoyo (2016), el cual indica que, para las regiones volcánicas de los estados de Puebla, Tlaxcala y parte de Veracruz, las aguas son ricas en  $\text{HCO}_3^-$ .

#### 5.1.1 Clasificación Agrícola

Se obtuvo la concentración iónica de las 27 muestras clasificadas para este uso de suelo y vegetación (ver Cuadro 5-1), mismas que en conjunto, presentan una media de pH de 8. La sumatoria de cationes es de 4.21 mEq  $\text{L}^{-1}$  y aniones de 4.37 mEq  $\text{L}^{-1}$ , el porcentaje de error para esta clasificación es de 1.70 y se clasifica como aguas bicarbonatadas de magnesio y cálcicas ( $\text{HCO}_3^- \text{Mg}^{2+} \text{Ca}^{2+}$ ), la mayor tendencia a variar por debajo o encima es para el ion sodio con 4.80 mEq  $\text{L}^{-1}$  entre muestras y el ion con menor tendencia a variar es el potasio con 0.45 mEq  $\text{L}^{-1}$  entre muestras. La mediana en cationes fue de 2.82 mEq  $\text{L}^{-1}$  y aniones de 2.88 mEq  $\text{L}^{-1}$ .

Cuadro 5-1. Concentración iónica de 27 sitios de muestreos clasificadas en uso de suelo y vegetación agrícola.

Sitio de muestreo	pH	CE $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	$\Sigma$ Cationes	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	$\Sigma$ Aniones	% Error	$\Sigma$ ppm $\Sigma$ mmol L <sup>-1</sup>	RSE mg L <sup>-1</sup>	RSC mg L <sup>-1</sup>
			mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>					mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>								
1	7.11	121.60	0.50	0.74	0.00	0.19	1.43	0.00	0.70	0.25	0.44	1.39	1.50		228	
		ppm	10.02	8.99	0.00	7.43		0.00	42.71	8.86	21.03				99.05	162
		mmol/L	1.00	1.48	0.00	0.19		0.00	0.70	0.25	0.22				3.84	
		%	34.97	51.75	0.00	13.29		0.00	50.44	18.01	31.55					
2	7.39	545.50	1.20	1.40	1.00	0.51	4.11	0.00	2.70	1.20	0.39	4.29	2.13		380	
		ppm	24.05	17.01	22.99	19.94		0.00	164.75	42.54	18.68				309.96	256
		mmol/L	2.40	2.80	1.00	0.51		0.00	2.70	1.20	0.19				10.80	
		%	29.20	34.06	24.33	12.41		0.00	62.95	27.98	9.07					
3	7.4	133.30	0.50	0.75	0.00	0.03	1.28	0.00	0.90	0.30	0.10	1.30	1.03		120	
		ppm	10.02	9.11	0.00	0.98		0.00	54.92	10.64	4.88				90.54	60
		mmol/L	1.00	1.50	0.00	0.03		0.00	0.90	0.30	0.05				3.78	
		%	39.22	58.82	0.00	1.96		0.00	69.14	23.05	7.81					
4	6.9	254.85	0.75	1.30	0.00	0.14	2.19	0.00	1.35	0.60	0.20	2.15	0.96		202	
		ppm	15.03	15.80	0.00	5.47		0.00	82.38	21.27	9.52				149.47	144
		mmol/L	1.50	2.60	0.00	0.14		0.00	1.35	0.60	0.10				6.29	
		%	34.25	59.36	0.00	6.39		0.00	62.84	27.93	9.23					
5	8.9	596.50	0.56	5.24	0.00	0.15	5.95	2.30	2.75	0.50	0.23	5.78	1.44		666	
		ppm	11.22	63.67	0.00	5.67		69.00	167.81	17.73	10.85				345.93	476
		mmol/L	1.12	10.48	0.00	0.15		1.15	2.75	0.50	0.11				16.26	
		%	9.42	88.14	0.00	2.44		39.82	47.61	8.66	3.91					
6	7.92	367.95	1.55	2.20	0.00	0.00	3.75	0.00	3.30	0.50	0.09	3.89	1.79		274	
		ppm	31.06	26.73	0.00	0.00		0.00	201.37	17.73	4.16				281.04	210
		mmol/L	3.10	4.40	0.00	0.00		0.00	3.30	0.50	0.04				11.34	
		%	41.33	58.67	0.00	0.00		0.00	84.91	12.86	2.23					
7	8.25	295.30	0.90	2.00	0.00	0.00	2.90	0.40	2.00	0.45	0.10	2.95	0.80		230	
		ppm	18.04	24.30	0.00	0.00		12.00	122.04	15.95	4.64				196.97	166
		mmol/L	1.80	4.00	0.00	0.00		0.20	2.00	0.45	0.05				8.50	
		%	31.03	68.97	0.00	0.00		13.57	67.87	15.27	3.28					

Sitio de muestreo	pH	CE $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	$\Sigma$ Cationes	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	$\Sigma$ Aniones	% Error	$\Sigma$ ppm $\Sigma$ mmol L <sup>-1</sup>	RSE mg L <sup>-1</sup> RSC mg L <sup>-1</sup>
			mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>					mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>							
8	7.52	296.80	0.85	1.95	0.00	0.02	2.82	0.00	2.10	0.60	0.18	2.88	1.02		232
		ppm	17.03	23.69	0.00	0.78		0.00	128.14	21.27	8.56			199.48	178
		mmol/L	1.70	3.90	0.00	0.02		0.00	2.10	0.60	0.09			8.41	
		%	30.14	69.15	0.00	0.71		0.00	72.96	20.85	6.19				
9	6.83	296.80	1.60	1.60	0.00	0.04	3.24	0.00	2.10	0.90	0.32	3.32	1.28		246
		ppm	32.06	19.44	0.00	1.56		0.00	128.14	31.91	15.55			228.66	178
		mmol/L	3.20	3.20	0.00	0.04		0.00	2.10	0.90	0.16			9.60	
		%	49.38	49.38	0.00	1.23		0.00	63.18	27.08	9.74				
10	8.2	196.45	0.60	1.30	0.00	0.00	1.90	0.00	1.50	0.40	0.07	1.97	1.69		196
		ppm	12.02	15.80	0.00	0.00		0.00	91.53	14.18	3.13			136.66	142
		mmol/L	1.20	2.60	0.00	0.00		0.00	1.50	0.40	0.03			5.73	
		%	31.58	68.42	0.00	0.00		0.00	76.33	20.35	3.32				
11	8.15	229.65	1.00	1.50	0.00	0.00	2.50	0.00	1.95	0.45	0.07	2.47	0.55		196
		ppm	20.04	18.23	0.00	0.00		0.00	118.99	15.95	3.50			176.70	188
		mmol/L	2.00	3.00	0.00	0.00		0.00	1.95	0.45	0.04			7.44	
		%	40.00	60.00	0.00	0.00		0.00	78.86	18.20	2.94				
12	8.11	276.10	1.00	1.70	0.00	0.00	2.70	0.00	2.30	0.35	0.15	2.80	1.74		238
		ppm	20.04	20.66	0.00	0.00		0.00	140.35	12.41	6.99			200.44	162
		mmol/L	2.00	3.40	0.00	0.00		0.00	2.30	0.35	0.07			8.12	
		%	37.04	62.96	0.00	0.00		0.00	82.27	12.52	5.21				
13	8.23	204.90	0.65	1.30	0.00	0.00	1.95	0.10	1.40	0.40	0.08	1.98	0.71		308
		ppm	13.03	15.80	0.00	0.00		3.00	85.43	14.18	3.74			135.17	128
		mmol/L	1.30	2.60	0.00	0.00		0.05	1.40	0.40	0.04			5.79	
		%	33.33	66.67	0.00	0.00		5.06	70.79	20.22	3.93				
14	8.51	459.50	1.10	3.50	0.00	0.00	4.60	1.60	1.90	1.00	0.25	4.75	1.65		300
		ppm	22.04	42.53	0.00	0.00		48.00	115.94	35.45	12.23			276.19	212
		mmol/L	2.20	7.00	0.00	0.00		0.80	1.90	1.00	0.13			13.03	
		%	23.91	76.09	0.00	0.00		33.65	39.96	21.03	5.36				

Sitio de muestreo	pH	CE $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	$\Sigma$ Cationes	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	$\Sigma$ Aniones	% Error	$\Sigma$ ppm $\Sigma$ mmol L <sup>-1</sup>	RSE mg L <sup>-1</sup> RSC mg L <sup>-1</sup>
			mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>					mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>							
15	7.62	274.80	1.45	1.15	0.10	0.29	2.99	0.00	2.20	0.65	0.18	3.03	0.72		188
		ppm	29.06	13.97	2.30	11.14		0.00	134.24	23.04	8.56			222.32	100
		mmol/L	2.90	2.30	0.10	0.29		0.00	2.20	0.65	0.09			8.52	
		%	48.58	38.53	3.35	9.55		0.00	72.65	21.47	5.88				
16	8.29	364.45	3.55	0.80	0.00	0.00	4.35	0.60	3.40	0.60	0.07	4.67	3.54		172
		ppm	71.14	9.72	0.00	0.00		18.00	207.47	21.27	3.31			330.91	116
		mmol/L	7.10	1.60	0.00	0.00		0.30	3.40	0.60	0.03			13.03	
		%	81.61	18.39	0.00	0.00		12.85	72.82	12.85	1.48				
17	8.08	327.85	2.80	1.80	0.00	0.00	4.60	0.40	3.40	0.50	0.05	4.35	2.78		138
		ppm	56.11	21.87	0.00	0.00		12.00	207.47	17.73	2.47			317.65	96
		mmol/L	5.60	3.60	0.00	0.00		0.20	3.40	0.50	0.03			13.33	
		%	60.87	39.13	0.00	0.00		9.19	78.14	11.49	1.18				
18	8.19	231.25	1.80	0.90	0.00	0.04	2.74	0.00	2.00	0.60	0.10	2.70	0.66		194
		ppm	36.07	10.94	0.00	1.56		0.00	122.04	21.27	5.00			196.88	116
		mmol/L	3.60	1.80	0.00	0.04		0.00	2.00	0.60	0.05			8.09	
		%	65.69	32.85	0.00	1.46		0.00	73.96	22.19	3.85				
19	8.42	367.00	2.30	1.90	0.00	0.01	4.21	0.60	2.90	0.60	0.14	4.24	0.36		250
		ppm	46.09	23.09	0.00	0.39		18.00	176.96	21.27	6.75			292.55	158
		mmol/L	4.60	3.80	0.00	0.01		0.30	2.90	0.60	0.07			12.28	
		%	54.63	45.13	0.00	0.24		14.15	68.39	14.15	3.31				
20	8.39	234.95	1.15	1.35	0.00	0.02	2.52	0.40	1.80	0.40	0.08	2.68	3.15		210
		ppm	23.05	16.40	0.00	0.78		12.00	109.84	14.18	4.04			180.28	142
		mmol/L	2.30	2.70	0.00	0.02		0.20	1.80	0.40	0.04			7.46	
		%	45.63	53.57	0.00	0.79		14.90	67.06	14.90	3.13				
21	7.73	161.05	1.20	1.00	0.00	0.03	2.23	0.00	1.50	0.65	0.10	2.25	0.43		124
		ppm	24.05	12.15	0.00	1.17		0.00	91.53	23.04	4.76			156.70	74
		mmol/L	2.40	2.00	0.00	0.03		0.00	1.50	0.65	0.05			6.63	
		%	53.81	44.84	0.00	1.35		0.00	66.69	28.90	4.41				

Sitio de muestreo	pH	CE μS/cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ Cationes	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ Aniones	% Error	Σppm Σmmol L <sup>-1</sup>	RSE mg L <sup>-1</sup> RSC mg L <sup>-1</sup>	
			mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>					mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>								
22	7.93	191.20	1.30	0.60	0.00	0.09	1.99	0.00	1.36	0.60	0.13	2.09	2.34		146	
		ppm	26.05	7.29	0.00	3.52		0.00	82.99	21.27	6.03				147.14	76
		mmol/L	2.60	1.20	0.00	0.09		0.00	1.36	0.60	0.06				5.91	
		%	65.33	30.15	0.00	4.52		0.00	65.21	28.77	6.02					
23	7.67	97.30	0.34	0.86	0.00	0.06	1.26	0.00	0.85	0.45	0.06	1.36	3.92		86	
		ppm	6.81	10.45	0.00	2.35		0.00	51.87	15.95	3.01				90.44	26
		mmol/L	0.68	1.72	0.00	0.06		0.00	0.85	0.45	0.03				3.79	
		%	26.98	68.25	0.00	4.76		0.00	62.37	33.02	4.60					
24	7.97	102.35	0.70	0.95	0.00	0.06	1.71	0.00	1.15	0.50	0.06	1.71	0.15		78	
		ppm	14.03	11.54	0.00	2.15		0.00	70.17	17.73	2.89				118.51	42
		mmol/L	1.40	1.90	0.00	0.06		0.00	1.15	0.50	0.03				5.04	
		%	41.06	55.72	0.00	3.23		0.00	67.24	29.24	3.52					
25	9.14	2984.00	0.50	1.50	24.70	2.34	29.04	3.60	10.90	10.60	6.27	31.37	3.86		2430	
		ppm	10.02	18.23	567.85	91.49		108.00	665.12	375.77	301.30				2137.78	1972
		mmol/L	1.00	3.00	24.70	2.34		1.80	10.90	10.60	3.14				57.48	
		%	1.72	5.17	85.06	8.06		11.47	34.74	33.79	20.00					
26	8.64	582.50	0.70	1.50	3.00	0.25	5.45	1.60	2.80	0.70	0.65	5.75	2.70		416	
		ppm	14.03	18.23	68.97	9.77		48.00	170.86	24.82	31.34				386.00	280
		mmol/L	1.40	3.00	3.00	0.25		0.80	2.80	0.70	0.33				12.28	
		%	12.84	27.52	55.05	4.59		27.81	48.68	12.17	11.34					
27	8.41	897.50	0.90	3.45	4.55	0.38	9.28	2.80	5.20	1.20	0.65	9.85	3.02		628	
		ppm	18.04	41.92	104.60	14.66		84.00	317.30	42.54	31.34				654.40	426
		mmol/L	1.80	6.90	4.55	0.38		1.40	5.20	1.20	0.33				21.75	
		%	9.70	37.20	49.06	4.04		28.42	52.78	12.18	6.62					
Media	8.00	410.79	1.16	1.64	1.24	0.17	4.21	0.53	2.46	0.96	0.42	4.37	1.70		328.74	
		ppm	23.34	19.91	28.40	6.70		16.00	150.09	34.07	19.93				298.44	232.81
		mmol/L	2.33	3.28	1.24	0.17		0.27	2.46	0.96	0.21				10.91	
		%	38.27	50.70	8.03	3.00		7.81	65.22	20.34	6.63					

Sitio de muestreo	pH	CE $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	$\Sigma$ Cationes	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	$\Sigma$ Aniones	% Error	$\Sigma$ ppm $\Sigma$ mmol L <sup>-1</sup>	RSE mg L <sup>-1</sup>	RSC mg L <sup>-1</sup>
			mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>					mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>								
<b>Mediana</b>	8.11	276.10	1.00	1.40	0.00	0.03	2.82	0.00	2.00	0.60	0.13	2.88	1.50		228.00	
		ppm	20.04	17.01	0.00	1.17		0.00	122.04	21.27	6.03			199.48	158.00	
		mmol/L	2.00	2.80	0.00	0.03		0.00	2.00	0.60	0.06			8.41		
		%	37.04	53.57	0.00	1.35		0.00	67.24	20.35	4.60					
<b>Moda</b>		0.50	1.30	0.00	0.00	4.60	0.00	2.10	0.60	0.18						
		ppm	10.02	15.80	0.00	0.00		0.00	128.14	21.27	8.56					
		mmol/L	1.00	2.60	0.00	0.00		0.00	2.10	0.60	0.09				116.00	
		%			0.00	0.00		0.00								
<b>Varianza</b>	0.32		0.55	1.02	23.06	0.20	27.63	0.95	3.80	3.77	1.40	32.42	1.24			
<b>Desvest estándar</b>	0.56		0.74	1.01	4.80	0.45	5.26	0.98	1.95	1.94	1.18	5.69	1.11			

### 5.1.2 Clasificación Bosque

Se obtuvo la concentración iónica de las cuatro muestras clasificadas para este uso de suelo y vegetación (ver Cuadro 5-2), mismas que en conjunto, presentan una media de pH de 7.59, sumatoria de cationes de 3.85 mEq L<sup>-1</sup> y aniones de 3.91 mEq L<sup>-1</sup>, el porcentaje de error para esta clasificación es de 1.25 y se clasifica como aguas de bicarbonato de calcio magnesio (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> Ca<sup>2+</sup> Mg<sup>2+</sup>), la mayor tendencia a variar por debajo o encima es para el ion bicarbonato con 3.92 mEq L<sup>-1</sup> entre muestras y el ion con menor tendencia a variar es el potasio con 0.02 mEq L<sup>-1</sup> entre muestras. La mediana en cationes fue de 2.04 mEq L<sup>-1</sup> y aniones de 2.08 mEq L<sup>-1</sup>, es necesario mencionar que para estas muestras no se obtuvo el ion sodio.

Cuadro 5-2. Concentración iónica de 4 sitios de muestreos clasificadas en uso de suelo y vegetación bosque.

Sitio de muestreo	pH	CE μS/cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ Cationes	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ Aniones	% Error	Σppm Σmmol L <sup>-1</sup>	RSE mg L <sup>-1</sup>	RSC mg L <sup>-1</sup>
			mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>					mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>								
1	6.54	6,535.00	5.60	4.50	0.00	0.01	10.11	0.00	9.00	0.95	0.30	10.25	0.69		506.00	
		ppm	112.22	54.68	0.00	0.39		0.00	549.18	33.68	14.46			764.61	394	
		mmol/L	11.20	9.00	0.00	0.01		0.00	9.00	0.95	0.15			30.31		
		%	55.39	44.51	0.00	0.10		0.00	87.80	9.27	2.94					
2	8.01	239.95	1.20	1.30	0.00	0.07	2.57	0.00	1.80	0.50	0.38	2.68	2.10		208.00	
		ppm	24.05	15.80	0.00	2.54		0.00	109.84	17.73	18.02			187.96	132	
		mmol/L	2.40	2.60	0.00	0.07		0.00	1.80	0.50	0.19			7.55		
		%	46.78	50.68	0.00	2.53		0.00	67.29	18.69	14.02					
3	8.01	121.25	0.80	0.70	0.00	0.02	1.52	0.00	1.00	0.40	0.08	1.48	1.24		130.00	
		ppm	16.03	8.51	0.00	0.59		0.00	61.02	14.18	3.74			104.06	58	
		mmol/L	1.60	1.40	0.00	0.02		0.00	1.00	0.40	0.04			4.45		
		%	52.81	46.20	0.00	0.99		0.00	67.67	27.07	5.26					
4	7.81	90.80	0.55	0.65	0.00	0.03	1.23	0.00	0.80	0.36	0.09	1.25	0.97		110.00	
		ppm	11.02	7.90	0.00	0.98		0.00	48.82	12.76	4.28			85.75	38	
		mmol/L	1.10	1.30	0.00	0.03		0.00	0.80	0.36	0.04			3.63		
		%	44.90	53.06	0.00	2.04		0.00	64.05	28.82	7.13					

<b>Media</b>	7.59	1746.75	2.04	1.79	0.00	0.03	3.85	0.00	3.15	0.55	0.21	3.91	1.25	238.50	
		ppm	40.83	21.72	0.00	1.12		0.00	192.21	19.59	10.12			285.60	155.50
		mmol/L	4.08	3.58	0.00	0.03		0.00	3.15	0.55	0.11			11.49	
		%	49.97	48.61	0.00	1.42		0.00	71.70	20.96	7.34				
<b>Mediana</b>	7.91	180.60	1.00	1.00	0.00	0.02	2.04	0.00	1.40	0.45	0.20	2.08	1.11	169.00	
		ppm	20.04	12.15	0.00	0.78		0.00	85.43	15.95	9.37			146.01	95.00
		mmol/L	2.00	2.00	0.00	0.02		0.00	1.40	0.45	0.10			6.00	
		%	49.79	48.44	0.00	1.52		0.00	67.48	22.88	6.20				
<b>Varianza</b>	0.50		5.71	3.36	0.00	0.00	17.73	0.00	15.40	0.07	0.02	18.24	0.37		
<b>Desviación estándar</b>	0.71		2.39	1.83	0.00	0.02	4.21	0.00	3.92	0.27	0.15	4.27	0.61		

### 5.1.3 Clasificación Lagos Cráter

Se obtuvo la concentración iónica de las seis muestras clasificadas para este uso de suelo y vegetación (ver Cuadro 5-3), mismas que en conjunto, presentan una media de pH de 8.94, sumatoria de cationes de 56.48 mEq L<sup>-1</sup> y aniones de 60.34 mEq L<sup>-1</sup>, el porcentaje de error para esta clasificación es de 2.72 y se clasifica como aguas indefinidas por la presencia de más de cuatro iones predominantes. Para esta clasificación de aguas no se encontraron relaciones similares entre muestras con base en la varianza y en la desviación estándar, mismas que indican tendencia a variar muy altas para los iones; cloro con 42.74 mEq L<sup>-1</sup>, sodio 35.15 mEq L<sup>-1</sup>, magnesio 18.60 mEq L<sup>-1</sup> y bicarbonato 12.21 mEq L<sup>-1</sup> entre muestras.

Cuadro 5-3. Concentración iónica de 6 sitios de muestreos clasificadas como Lagos Cráter

Sitio de muestreo	pH	CE μS/cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ Cationes	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ Aniones	% Error	Σppm Σmmol L <sup>-1</sup>	RSE mg L <sup>-1</sup>	
			mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>					mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>							RSC mg L <sup>-1</sup>	
<b>1</b>	9.01	12460.00	0.80	34.90	82.55	4.29	122.54	22.20	19.95	81.81	7.65	131.61	3.57		9058.00	
		ppm	16.03	424.04	1897.82	167.53		666.00	1217.35	2900.16	367.59				7656.53	7854.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.60	69.80	82.55	4.29		11.10	19.95	81.81	3.83				274.92	
		%	0.65	28.48	67.37	3.50		16.87	15.16	62.16	5.81					
<b>2</b>	8.88	2129.50	0.80	16.40	6.30	0.37	23.87	7.00	6.00	10.15	1.00	24.15	0.60		1522.00	
		ppm	16.03	199.26	144.84	14.27		210.00	366.12	359.82	48.21				1358.55	978.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.60	32.80	6.30	0.37		3.50	6.00	10.15	0.50				61.22	
		%	3.35	68.72	26.40	1.53		28.98	24.84	42.02	4.16					

Sitio de muestreo	pH	CE μS/cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ Cationes	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ Aniones	% Error	Σppm Σmmol L <sup>-1</sup>	RSE mg L <sup>-1</sup>	RSC mg L <sup>-1</sup>
			mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>					mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>								
3	8.77	833.00	0.85	6.25	1.90	0.17	9.17	2.00	4.45	2.90	0.45	9.80	3.33		540.00	
		ppm	17.03	75.94	43.68	6.65		60.00	271.54	102.81	21.69				599.34	352.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.70	12.50	1.90	0.17		1.00	4.45	2.90	0.23				24.85	
		%	9.27	68.16	20.72	1.85		20.40	45.40	29.59	4.61					
4	8.6	11655.00	0.45	47.95	65.65	1.75	115.80	17.20	11.80	90.90	4.27	124.17	3.49		8942.00	
		ppm	9.02	582.59	1509.29	68.42		516.00	720.04	3222.41	204.88				6832.65	6752.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.90	95.90	65.65	1.75		8.60	11.80	90.90	2.13				277.63	
		%	0.39	41.41	56.69	1.51		13.85	9.50	73.21	3.44					
5	9.05	1224.00	0.95	6.55	5.85	0.52	13.87	6.00	5.60	2.10	0.55	14.25	1.38		898.00	
		ppm	19.04	79.58	134.49	20.14		180.00	341.71	74.45	26.51				875.92	524.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.90	13.10	5.85	0.52		3.00	5.60	2.10	0.28				32.34	
		%	6.85	47.24	42.19	3.71		42.10	39.29	14.73	3.87					
6	9.32	5300.00	0.20	1.25	49.40	2.80	53.65	17.40	35.90	0.90	3.88	58.08	3.97		4212.00	
		ppm	4.01	15.19	1135.71	109.28		522.00	2190.62	31.91	186.20				4194.91	3692.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.40	2.50	49.40	2.80		8.70	35.90	0.90	1.94				102.53	
		%	0.37	2.33	92.09	5.21		29.96	61.81	1.55	6.68					
Media	8.94	5600.25	0.68	18.88	35.28	1.65	56.48	11.97	13.95	31.46	2.97	60.34	2.72		4195.33	
		ppm	13.53	229.43	810.97	64.38		359.00	851.23	1115.26	142.51				3586.31	3358.67
		mmol L <sup>-1</sup>	1.35	37.77	35.28	1.65		5.98	13.95	31.46	1.48				128.92	
		%	3.48	42.72	50.91	2.89		25.36	32.67	37.21	4.76					
Mediana	8.95	3714.75	0.80	11.48	27.85	1.13	38.76	12.10	8.90	6.53	2.44	41.12	3.41		2867.00	
		ppm	16.03	139.42	640.27	44.28		363.00	543.08	231.31	117.21				2776.73	2335.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.60	22.95	27.85	1.13		6.05	8.90	6.53	1.22				81.88	
		%	2.00	44.32	49.44	2.68		24.69	32.07	35.80	4.38					
Varianza	0.06		0.08	346.04	1235.27	2.68	2601.64	64.25	149.12	1826.79	8.10	3029.28	1.91			
Desvest	0.25		0.29	18.60	35.15	1.64	51.01	8.02	12.21	42.74	2.85	55.04	1.38			

### 5.1.4 Clasificación las Salinas

Esta clasificación corresponde al uso de suelo y vegetación de tipo Matorral, se obtuvo la concentración iónica de 47 muestras (ver Cuadro 5-4), mismas que en conjunto, presentan una media de pH de 8.65, sumatoria de cationes de 395.90 mEq L<sup>-1</sup> y aniones de 408.86 mEq L<sup>-1</sup>, el porcentaje de error para esta clasificación es de 2.98 y se clasifica como aguas de cloruro de sodio (Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>). Para esta clasificación la mayor varianza se presentó en el ion Na<sup>+</sup> y en el ion Cl<sup>-</sup>, misma que indican tendencia a variar muy altas de 231.54 mEq L<sup>-1</sup> para sodio y 150.26 mEq L<sup>-1</sup> para cloro entre muestras esto debido a la muestra número 47 que dispara la varianza, dicha muestra corresponde al río salado, el cuál al no ser una muestra evaporada la concentración en iones es baja con respecto a las demás, la tendencia menor a variar es para el ion calcio con 0.60 mEq L<sup>-1</sup> entre muestras. La mediana en sumatoria de cationes es de 362.80 mEq L<sup>-1</sup> y 384.73 mEq L<sup>-1</sup> para aniones.

Cuadro 5-4 Concentración iónica de 47 sitios de muestreos clasificadas como Las Salinas

N° Muestra	pH	CE μS/cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ Cationes	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ Aniones	% Error	Σppm Σmmol L <sup>-1</sup>	RSE mg L <sup>-1</sup> RSC mg L <sup>-1</sup>	
			mmol L <sup>-1</sup>					mmol L <sup>-1</sup>								
1	9.62	62900.00	0.50	0.85	672.00	10.60	683.95	284.00	40.00	310.00	0.37	634.37	3.76		51150.00	
		ppm	10.02	10.33	15449.28	414.44		8520.00	2440.80	10989.50	17.72				37852.08	49416.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.00	1.70	672.00	10.60		142.00	40.00	310.00	0.18				1177.48	
		%	0.07	0.12	98.25	1.55		44.77	6.31	48.87	0.06					
2	8.88	34510.00	0.50	5.40	284.00	1.40	291.30	62.00	48.00	199.20	0.64	309.84	3.08		32120.00	
		ppm	10.02	65.61	6529.16	54.74		1860.00	2928.96	7061.64	30.67				18540.80	31066.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.00	10.80	284.00	1.40		31.00	48.00	199.20	0.32				575.72	
		%	0.17	1.85	97.49	0.48		20.01	15.49	64.29	0.21					
3	8.65	42470.00	0.40	6.10	368.00	2.20	376.70	48.00	64.00	273.90	0.22	386.12	1.23		25514.00	
		ppm	8.02	74.12	8460.32	86.02		1440.00	3905.28	9709.76	10.33				23693.84	21948.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.80	12.20	368.00	2.20		24.00	64.00	273.90	0.11				745.21	
		%	0.11	1.62	97.69	0.58		12.43	16.58	70.94	0.06					
4	9.34	18300.00	0.40	0.80	151.00	0.75	152.95	30.00	11.00	107.90	0.30	149.20	1.24		12226.00	
		ppm	8.02	9.72	3471.49	29.32		900.00	671.22	3825.06	14.40				8929.23	11654.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.80	1.60	151.00	0.75		15.00	11.00	107.90	0.15				288.20	
		%	0.26	0.52	98.73	0.49		20.11	7.37	72.32	0.20					

N° Muestra	pH	CE μS/cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ	%	Σppm	RSE mg L <sup>-1</sup>	
			mmol L <sup>-1</sup>				Cationes	mmol L <sup>-1</sup>				Aniones	Error	Σmmol L <sup>-1</sup>	RSC mg L <sup>-1</sup>	
5	9.61	13770.00	0.40	0.30	129.05	2.20	131.95	40.00	1.00	83.00	0.21	124.21	3.02		8578.00	
		ppm	8.02	3.65	2966.86	86.02		1200.00	61.02	2942.35	10.30				7278.21	8058.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.80	0.60	129.05	2.20		20.00	1.00	83.00	0.11				236.76	
		%	0.30	0.23	97.80	1.67		32.20	0.81	66.82	0.17					
6	7.87	37280.00	0.60	8.70	340.50	3.30	353.10	14.00	97.00	224.10	0.64	335.74	2.52		27508.00	
		ppm	12.02	105.71	7828.10	129.02		420.00	5918.94	7944.35	30.55				22388.68	26248.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.20	17.40	340.50	3.30		7.00	97.00	224.10	0.32				690.82	
		%	0.17	2.46	96.43	0.93		4.17	28.89	66.75	0.19					
7	7.87	27720.00	1.95	6.10	262.50	2.20	272.75	8.00	94.00	182.60	0.52	285.12	2.22		20088.00	
		ppm	39.08	74.12	6034.88	86.02		240.00	5735.88	6473.17	25.13				18708.26	19094.00
		mmol L <sup>-1</sup>	3.90	12.20	262.50	2.20		4.00	94.00	182.60	0.26				561.66	
		%	0.71	2.24	96.24	0.81		2.81	32.97	64.04	0.18					
8	9.15	94600.00	0.50	0.66	1042.00	13.60	1056.76	220.00	85.00	680.60	0.07	985.67	3.48		83270.00	
		ppm	10.02	8.02	23955.58	531.73		6600.00	5186.70	24127.27	3.30				60422.62	81244.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.00	1.32	1042.00	13.60		110.00	85.00	680.60	0.03				1933.55	
		%	0.05	0.06	98.60	1.29		22.32	8.62	69.05	0.01					
9	9.06	67950	0.30	4.15	648.00	17.40	669.85	152.00	65.00	406.70	0.39	624.09	3.54		56464.00	
		ppm	6.01	50.42	14897.52	680.31		4560.00	3966.30	14417.52	18.86				38596.93	54092.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.60	8.30	648.00	17.40		76.00	65.00	406.70	0.20				1222.20	
		%	0.04	0.62	96.74	2.60		24.36	10.42	65.17	0.06					
10	9.3	114150	0.80	7.00	1122.00	52.00	1181.80	322.00	81.00	722.10	0.09	1125.19	2.45		92726.00	
		ppm	16.03	85.05	25794.78	2033.10		9660.00	4942.62	25598.45	4.19				68134.22	87714.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.60	14.00	1122.00	52.00		161.00	81.00	722.10	0.04				2153.74	
		%	0.07	0.59	94.94	4.40		28.62	7.20	64.18	0.01					
11	8.44	56400	0.95	9.95	548.00	6.10	565.00	50.00	89.00	415.00	0.24	554.24	0.96		43712.00	
		ppm	19.04	120.89	12598.52	238.50		1500.00	5430.78	14711.75	11.75				34631.23	41922.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.90	19.90	548.00	6.10		25.00	89.00	415.00	0.12				1105.02	
		%	0.17	1.76	96.99	1.08		9.02	16.06	74.88	0.04					

N° Muestra	pH	CE μS/cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ	%	Σppm Σmmol L <sup>-1</sup>	RSE mg L <sup>-1</sup>
			mmol L <sup>-1</sup>						mmol L <sup>-1</sup>				Aniones		Error
12	8.4	54250	1.25	7.60	503.00	6.20	518.05	40.00	78.00	365.20	75.28	558.48	3.76		42262.00
		ppm	25.05	92.34	11563.97	242.41		1200.00	4759.56	12946.34	3615.60			34445.27	40832.00
		mmol L <sup>-1</sup>	2.50	15.20	503.00	6.20		20.00	78.00	365.20	37.64			1027.74	
		%	0.24	1.47	97.09	1.20		7.16	13.97	65.39	13.48				
13	8.63	43550	0.55	4.65	409.00	5.00	419.20	44.00	44.00	298.80	52.19	438.99	2.31		33390.00
		ppm	11.02	56.50	9402.91	195.49		1320.00	2684.88	10592.46	2506.8			26770.07	32422.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.10	9.30	409.00	5.00		22.00	44.00	298.80	26.10			815.30	
		%	0.13	1.11	97.57	1.19		10.02	10.02	68.06	11.89				
14	8.34	65000	0.50	8.35	635.00	8.10	651.95	48.00	94.00	448.20	110.41	700.61	3.60		53354.00
		ppm	10.02	101.45	14598.65	316.69		1440.00	5735.88	15888.69	5302.9			43394.27	51714.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.00	16.70	635.00	8.10		24.00	94.00	448.20	55.20			1282.20	
		%	0.08	1.28	97.40	1.24		6.85	13.42	63.97	15.76				
15	8.93	67400	0.35	5.90	685.00	9.00	700.25	116.00	54.00	456.50	122.45	748.95	3.36		55936.00
		ppm	7.01	71.69	15748.15	351.88		3480.00	3295.08	16182.93	5881.4			45018.11	54228.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.70	11.80	685.00	9.00		58.00	54.00	456.50	61.23			1336.23	
		%	0.05	0.84	97.82	1.29		15.49	7.21	60.95	16.35				
16	8.29	37620	0.90	5.90	346.00	3.30	356.10	24.00	60.00	265.60	35.13	384.73	3.86		28588.00
		ppm	18.04	71.69	7954.54	129.02		720.00	3661.20	9415.52	1687.3			23657.29	27448.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.80	11.80	346.00	3.30		12.00	60.00	265.60	17.56			718.06	
		%	0.25	1.66	97.16	0.93		6.24	15.60	69.04	9.13				
17	8.40	57050	0.40	9.35	576.00	8.10	593.85	36.00	94.00	415.00	95.85	640.85	3.81		44954.00
		ppm	8.02	113.60	13242.24	316.69		1080.00	5735.88	14711.75	4603.9			39812.05	43096.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.80	18.70	576.00	8.10		18.00	94.00	415.00	47.93			1178.53	
		%	0.07	1.57	96.99	1.36		5.62	14.67	64.76	14.96				
18	8.20	51950	0.50	8.40	533.00	5.70	547.60	20.00	107.00	381.80	79.04	587.84	3.54		43870.00
		ppm	10.02	102.06	12253.67	222.86		600.00	6529.14	13534.81	3796.4			37048.94	42104.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.00	16.80	533.00	5.70		10.00	107.00	381.80	39.52			1094.82	
		%	0.09	1.53	97.33	1.04		3.40	18.20	64.95	13.45				

N° Muestra	pH	CE μS/cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ	%	Σppm	RSE mg L <sup>-1</sup>	
			mmol L <sup>-1</sup>				Cationes	mmol L <sup>-1</sup>				Aniones	Error	Σmmol L <sup>-1</sup>	RSC mg L <sup>-1</sup>	
19	8.35	48150	1.21	8.89	446.00	6.80	462.90	28.00	84.00	332.00	46.67	490.67	2.91		37634.00	
		ppm	24.25	108.01	10253.54	265.87		840.00	5125.68	11769.40	2241.7				30628.42	36254.00
		mmol L <sup>-1</sup>	2.42	17.78	446.00	6.80		14.00	84.00	332.00	23.34				926.34	
		%	0.26	1.92	96.35	1.47		5.71	17.12	67.66	9.51					
20	7.99	44100	2.20	8.20	408.00	5.20	423.60	14.00	77.00	307.10	60.47	458.57	3.96		33848.00	
		ppm	44.09	99.63	9379.92	203.31		420.00	4698.54	10886.70	2904.5				28636.72	32660.00
		mmol L <sup>-1</sup>	4.40	16.40	408.00	5.20		7.00	77.00	307.10	30.24				855.34	
		%	0.52	1.94	96.32	1.23		3.05	16.79	66.97	13.19					
21	8.68	23630	2.80	10.10	212.00	2.70	227.60	16.00	22.00	170.15	31.37	239.52	2.55		17730.00	
		ppm	56.11	122.72	4873.88	105.56		480.00	1342.44	6031.82	1506.5				14519.03	16868.00
		mmol L <sup>-1</sup>	5.60	20.20	212.00	2.70		8.00	22.00	170.15	15.68				456.33	
		%	1.23	4.44	93.15	1.19		6.68	9.19	71.04	13.10					
22	8.02	60750	0.65	12.70	612.00	6.50	631.85	28.00	100.00	456.50	84.56	669.06	2.86		49406.00	
		ppm	13.03	154.31	14069.88	254.14		840.00	6102.00	16182.93	4061.5				41677.80	47748.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.30	25.40	612.00	6.50		14.00	100.00	456.50	42.28				1257.98	
		%	0.10	2.01	96.86	1.03		4.18	14.95	68.23	12.64					
23	7.89	38610	1.85	14.95	343.00	3.00	362.80	10.00	60.00	257.30	53.95	381.25	2.48		28878.00	
		ppm	37.07	181.64	7885.57	117.29		300.00	3661.20	9121.29	2591.2				23895.24	27676.00
		mmol L <sup>-1</sup>	3.70	29.90	343.00	3.00		5.00	60.00	257.30	26.97				728.87	
		%	0.51	4.12	94.54	0.83		2.62	15.74	67.49	14.15					
24	8.17	28950	0.80	15.30	250.00	2.00	268.10	8.00	36.00	199.20	36.13	279.33	2.05		20742.00	
		ppm	16.03	185.90	5747.50	78.20		240.00	2196.72	7061.64	1735.5				17261.47	19800.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.60	30.60	250.00	2.00		4.00	36.00	199.20	18.07				541.47	
		%	0.30	5.71	93.25	0.75		2.86	12.89	71.31	12.94					
25	9.22	21780	0.60	4.75	180.00	0.65	186.00	18.00	0.00	141.10	29.23	188.33	0.62		15092.00	
		ppm	12.02	57.71	4138.20	25.41		540.00	0.00	5002.00	1404.1				11179.40	14668.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.20	9.50	180.00	0.65		9.00	0.00	141.10	14.62				356.07	
		%	0.32	2.55	96.77	0.35		9.56	0.00	74.92	15.52					

N° Muestra	pH	CE μS/cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ	%	Σppm Σmmol L <sup>-1</sup>	RSE mg L <sup>-1</sup>
			mmol L <sup>-1</sup>						mmol L <sup>-1</sup>						Aniones
26	8.24	12880	1.30	10.80	105.40	1.04	118.54	8.00	12.00	91.30	13.30	124.60	2.49		8480.00
		ppm	26.05	131.22	2423.15	40.66		240.00	732.24	3236.59	638.76			7468.66	8040.00
		mmol L <sup>-1</sup>	2.60	21.60	105.40	1.04		4.00	12.00	91.30	6.65			244.59	
		%	1.10	9.11	88.92	0.88		6.42	9.63	73.28	10.67				
27	8.55	36490	0.45	12.60	338.00	2.00	353.05	26.00	41.00	249.00	53.20	369.20	2.24		27126.00
		ppm	9.02	153.09	7770.62	78.20		780.00	2501.82	8827.05	2555.0			22674.82	25984.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.90	25.20	338.00	2.00		13.00	41.00	249.00	26.60			695.70	
		%	0.13	3.57	95.74	0.57		7.04	11.11	67.44	14.41				
28	8.55	20460	0.90	14.90	161.00	1.50	178.30	18.00	16.00	132.80	25.22	192.02	3.7		14146.00
		ppm	18.04	181.04	3701.39	58.65		540.00	976.32	4707.76	1211.2			11394.42	13486.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.80	29.80	161.00	1.50		9.00	16.00	132.80	12.61			364.51	
		%	0.50	8.36	90.30	0.84		9.37	8.33	69.16	13.13				
29	8.66	39710	0.25	10.65	372.00	6.10	389.00	30.00	45.00	273.90	69.26	418.16	3.61		30126.00
		ppm	5.01	129.40	8552.28	238.50		900.00	2745.90	9709.76	3326.4			25607.19	28710.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.50	21.30	372.00	6.10		15.00	45.00	273.90	34.63			768.43	
		%	0.06	2.74	95.63	1.57		7.17	10.76	65.50	16.56				
30	8.91	26680	0.80	21.80	230.00	3.00	255.60	30.00	14.00	190.90	40.15	275.05	3.66		19182.00
		ppm	16.03	264.87	5287.70	117.29		900.00	854.28	6767.41	1928.3			16135.90	18178.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.60	43.60	230.00	3.00		15.00	14.00	190.90	20.07			518.17	
		%	0.31	8.53	89.98	1.17		10.91	5.09	69.41	14.60				
31	8.64	48500	0.10	8.65	456.00	4.40	469.15	36.00	44.00	282.20	145.54	507.74	3.95		37626.00
		ppm	2.00	105.10	10483.44	172.03		1080.00	2684.88	10003.99	6990.2			31521.60	36372.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.20	17.30	456.00	4.40		18.00	44.00	282.20	72.77			894.87	
		%	0.02	1.84	97.20	0.94		7.09	8.67	55.58	28.66				
32	8.76	50500	0.35	11.90	474.00	5.20	491.45	50.00	57.00	373.50	49.68	530.18	3.79		39302.00
		ppm	7.01	144.59	10897.26	203.31		1500.00	3478.14	13240.58	2386.3			31857.18	37866.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.70	23.80	474.00	5.20		25.00	57.00	373.50	24.84			984.04	
		%	0.07	2.42	96.45	1.06		9.43	10.75	70.45	9.37				

N° Muestra	pH	CE μS/cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ	%	Σppm	RSE mg L <sup>-1</sup>	
			mmol L <sup>-1</sup>				Cationes	mmol L <sup>-1</sup>				Aniones	Error	Σmmol L <sup>-1</sup>	RSC mg L <sup>-1</sup>	
33	8.63	52750	0.55	7.30	510.00	6.20	524.05	44.00	58.00	381.80	83.31	567.11	3.95		41594.00	
		ppm	11.02	88.70	11724.90	242.41		1320.00	3539.16	13534.81	4001.3				34462.26	40244.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.10	14.60	510.00	6.20		22.00	58.00	381.80	41.65				1035.35	
		%	0.10	1.39	97.32	1.18		7.76	10.23	67.32	14.69					
34	8.12	27510	2.30	11.10	239.00	2.50	254.90	10.00	37.00	190.90	36.89	274.79	3.75		19594.00	
		ppm	46.09	134.87	5494.61	97.75		300.00	2257.74	6767.41	1771.6				16870.10	18758.00
		mmol L <sup>-1</sup>	4.60	22.20	239.00	2.50		5.00	37.00	190.90	18.44				519.64	
		%	0.90	4.35	93.76	0.98		3.64	13.47	69.47	13.42					
35	9.2	11170	0.85	7.35	94.30	1.21	103.71	16.00	2.00	83.00	11.29	112.29	3.97		7388.00	
		ppm	17.03	89.30	2167.96	47.31		480.00	122.04	2942.35	542.34				6408.33	6918.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.70	14.70	94.30	1.21		8.00	2.00	83.00	5.65				210.56	
		%	0.82	7.09	90.93	1.17		14.25	1.78	73.91	10.06					
36	8.55	22310	1.05	6.80	298.50	4.20	310.55	24.00	32.00	224.10	55.58	335.68	3.89		23646.00	
		ppm	21.04	82.62	6862.52	164.21		720.00	1952.64	7944.35	2669.5				20416.89	22644.00
		mmol L <sup>-1</sup>	2.10	13.60	298.50	4.20		12.00	32.00	224.10	27.79				614.29	
		%	0.34	2.19	96.12	1.35		7.15	9.53	66.76	16.56					
37	9.2	20720	1.25	4.75	185.00	2.30	193.30	20.00	21.00	132.80	27.60	201.40	2.05		14760.00	
		ppm	25.05	57.71	4253.15	89.93		600.00	1281.42	4707.76	1325.7				12340.74	14196.00
		mmol L <sup>-1</sup>	2.50	9.50	185.00	2.30		10.00	21.00	132.80	13.80				376.90	
		%	0.65	2.46	95.71	1.19		9.93	10.43	65.94	13.70					
38	9.12	14500	1.00	5.20	125.35	1.75	133.30	14.00	4.00	107.90	18.32	144.22	3.93		9818.00	
		ppm	20.04	63.18	2881.80	68.42		420.00	244.08	3825.06	879.80				8402.37	9484.00
		mmol L <sup>-1</sup>	2.00	10.40	125.35	1.75		7.00	4.00	107.90	9.16				267.56	
		%	0.75	3.90	94.04	1.31		9.71	2.77	74.82	12.70					
39	8.64	27640	0.60	5.40	258.00	3.00	267.00	16.00	24.00	199.20	44.79	283.99	3.08		20074.00	
		ppm	12.02	65.61	5931.42	117.29		480.00	1464.48	7061.64	2151.3				17283.75	19368.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.20	10.80	258.00	3.00		8.00	24.00	199.20	22.40				526.60	
		%	0.22	2.02	96.63	1.12		5.63	8.45	70.14	15.77					

N° Muestra	pH	CE μS/cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ	%	Σppm	RSE mg L <sup>-1</sup>	
			mmol L <sup>-1</sup>				Cationes	mmol L <sup>-1</sup>				Aniones	Error	Σmmol L <sup>-1</sup>	RSC mg L <sup>-1</sup>	
40	8.22	40700	0.50	8.40	384.00	8.00	400.90	16.00	58.00	282.20	65.24	421.44	2.5		31412.00	
		ppm	10.02	102.06	8828.16	312.78		480.00	3539.16	10003.99	3133.5				26409.69	30270.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.00	16.80	384.00	8.00		8.00	58.00	282.20	32.62				790.62	
		%	0.12	2.10	95.78	2.00		3.80	13.76	66.96	15.48					
41	8.84	15350	0.40	4.80	128.90	2.80	136.90	12.00	16.00	99.60	20.45	148.05	3.91		10716.00	
		ppm	8.02	58.32	2963.41	109.47		360.00	976.32	3530.82	982.24				8988.60	10056.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.80	9.60	128.90	2.80		6.00	16.00	99.60	10.23				273.93	
		%	0.29	3.51	94.16	2.05		8.11	10.81	67.27	13.81					
42	8.3	49550	0.20	8.70	468.00	8.40	485.30	24.00	78.00	365.20	50.94	518.14	3.27		39754.00	
		ppm	4.01	105.71	10759.32	328.42		720.00	4759.56	12946.34	2446.6				32069.91	38300.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.40	17.40	468.00	8.40		12.00	78.00	365.20	25.47				974.87	
		%	0.04	1.79	96.44	1.73		4.63	15.05	70.48	9.83					
43	8.43	30440	1.00	6.30	272.00	6.10	285.40	18.00	49.00	199.20	35.13	301.33	2.71		23024.00	
		ppm	20.04	76.55	6253.28	238.50		540.00	2989.98	7061.64	1687.3				18867.26	21904.00
		mmol L <sup>-1</sup>	2.00	12.60	272.00	6.10		9.00	49.00	199.20	17.56				567.46	
		%	0.35	2.21	95.30	2.14		5.97	16.26	66.11	11.66					
44	8.94	57350	0.30	7.70	534.00	8.00	550.00	54.00	47.00	431.60	50.69	583.29	2.94		46710.00	
		ppm	6.01	93.56	12276.66	312.78		1620.00	2867.94	15300.22	2434.5				34911.67	45174.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.60	15.40	534.00	8.00		27.00	47.00	431.60	25.34				1088.94	
		%	0.05	1.40	97.09	1.45		9.26	8.06	73.99	8.69					
45	8.71	55900	0.20	7.40	524.00	7.10	538.70	56.00	68.00	348.60	66.75	539.35	0.06		44904.00	
		ppm	4.01	89.91	12046.76	277.60		1680.00	4149.36	12357.87	3205.8				33811.34	43492.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.40	14.80	524.00	7.10		28.00	68.00	348.60	33.37				1024.27	
		%	0.04	1.37	97.27	1.32		10.38	12.61	64.63	12.38					
46	9.48	8310	0.20	1.60	73.10	1.74	76.64	11.20	4.40	58.00	8.98	82.58	3.73		5572.00	
		ppm	4.01	19.44	1680.57	68.03		336.00	268.49	2056.10	431.46				4864.10	5232.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.40	3.20	73.10	1.74		5.60	4.40	58.00	4.49				150.93	
		%	0.26	2.09	95.38	2.27		13.56	5.33	70.23	10.88					

N° Muestra	pH	CE μS/cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ	%	Σppm Σmmol L <sup>-1</sup>	RSE mg L <sup>-1</sup>	
			mmol L <sup>-1</sup>						mmol L <sup>-1</sup>						Aniones	Error
47	8.41	480	1.60	2.00	1.40	0.21	5.21	0.40	2.00	1.60	0.82	4.82	3.93		322.00	
		ppm	32.06	24.30	32.19	8.21		12.00	122.04	56.72	39.17				326.69	228.00
		mmol L <sup>-1</sup>	3.20	4.00	1.40	0.21		0.20	2.00	1.60	0.41				13.02	
		%	30.71	38.39	26.87	4.03		8.31	41.53	33.23	16.94					
Media	8.65	40058.30	0.81	7.68	381.64	5.76	395.89	47.10	49.24	272.32	40.20	408.86	2.98		31368.43	
		ppm	16.21	93.36	8773.86	225.23		1412.94	3004.78	9653.60	1930.9				25110.93	30103.79
		mmol L <sup>-1</sup>	1.62	15.37	381.64	5.76		23.55	49.24	272.32	20.10				769.59	
		%	0.94	3.34	94.37	1.35		10.42	12.23	66.90	10.45					
Mediana	8.63	38610.00	0.60	7.40	346.00	4.20	362.80	26.00	48.00	265.60	36.13	384.73	3.27		28878.00	
		ppm	12.02	89.91	7954.54	164.21		780.00	2928.96	9415.52	1735.5				23693.84	27676.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.20	14.80	346.00	4.20		13.00	48.00	265.60	18.07				728.87	
		%	0.22	2.01	96.44	1.19		7.76	10.76	67.44	12.70					
Varianza	0.21		0.36	17.94	53612.12	59.63	56263.2	4454.99	991.23	22578.54	1288.1	53728.90	0.95			
Desvest	0.46		0.60	4.24	231.54	7.72	237.20	66.75	31.48	150.26	35.89	231.79	0.98			

### 5.1.5 Clasificación Pastizal

Se obtuvo la concentración iónica de las cuatro muestras clasificadas para este uso de suelo y vegetación (ver Cuadro 5-5), mismas que en conjunto, presentan una media de pH de 7.36, sumatoria de cationes de 6.43 mEq L<sup>-1</sup> y aniones de 6.67 mEq L<sup>-1</sup>, el porcentaje de error para esta clasificación es de 2.06 y se clasifica como aguas de bicarbonato cloradas de sodio y calcio (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup> y Ca<sup>2+</sup>). Para esta clasificación se encontraron relaciones similares entre muestras con base en la varianza y en la desviación estándar, mismas que indican poca tendencia a variar, el ion sodio presenta la mayor tendencia con 5.05 mEq L<sup>-1</sup> entre muestras, seguido por el ion bicarbonato con 3.92 mEq L<sup>-1</sup> entre muestras, los iones que menor tendencia a variar presentaron fue el ion potasio y el ion carbonato con 0.34 y 0.35 mEq L<sup>-1</sup> entre muestras respectivamente.

Cuadro 5-5 Concentración iónica de cuatro sitios de muestreos clasificadas como pastizal

Sitio de muestreo	pH	CE μS/cm <sup>-1</sup>	Cationes				Σ	Aniones				Σ	% Error	Σppm Σmmol L <sup>-1</sup>	RSE mg L <sup>-1</sup> RSC mg L <sup>-1</sup>
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>		CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>				
			mmolc L <sup>-1</sup>				mmolc L <sup>-1</sup>								
1	8.18	980	5.40	3.00	0.00	0.26	8.66	0.70	4.70	3.00	0.54	8.94	1.59		638.00
		ppm	108.22	36.45	0.00	10.17		21.00	286.79	106.35	25.91			594.89	480.00
		mmol L <sup>-1</sup>	10.80	6.00	0.00	0.26		0.35	4.70	3.00	0.27			25.38	
		%	62.36	34.64	0.00	3.00		7.83	52.58	33.56	6.03				
2	7.64	100	0.70	0.60	0.00	0.06	1.36	0.00	0.90	0.50	0.06	1.46	3.55		56.00
		ppm	14.03	7.29	0.00	2.35		0.00	54.92	17.73	2.89			99.21	20.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.40	1.20	0.00	0.06		0.00	0.90	0.50	0.03			4.09	
		%	51.47	44.12	0.00	4.41		0.00	61.63	34.24	4.12				
3	7.2	670	0.50	0.80	2.50	0.20	4.00	0.00	1.00	1.00	2.08	4.08	1.02		2314.00
		ppm	10.02	9.72	57.48	7.82		0.00	61.02	35.45	100.03			281.53	1404.00
		mmol L <sup>-1</sup>	1.00	1.60	2.50	0.20		0.00	1.00	1.00	1.04			8.34	
		%	12.50	20.00	62.50	5.00		0.00	24.49	24.49	51.01				
4	6.4	1150	0.10	0.10	10.65	0.83	11.68	0.00	9.20	1.90	1.08	12.18	2.09		26314.00
		ppm	2.00	1.22	244.84	32.45		0.00	561.38	67.36	51.82			961.07	15804.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.20	0.20	10.65	0.83		0.00	9.20	1.90	0.54			23.52	
		%	0.86	0.86	91.18	7.11		0.00	75.54	15.60	8.86				

Sitio de muestreo	pH	CE $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	$\Sigma$ Cationes	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	$\Sigma$ Aniones	% Error	$\Sigma$ ppm $\Sigma$ mmol L <sup>-1</sup>	RSE mg L <sup>-1</sup>	RSC mg L <sup>-1</sup>	
			mmolc L <sup>-1</sup>					mmolc L <sup>-1</sup>									
<b>Media</b>	7.36	725.00	1.68	1.13	3.29	0.34	6.43	0.18	3.95	1.60	0.94	6.67	2.06	484.17	7330.50	4427.00	
		ppm	33.57	13.67	75.58	13.20		5.25	241.03	56.72	45.16						15.33
		mmol L <sup>-1</sup>	3.35	2.25	3.29	0.34		0.09	3.95	1.60	0.47						
		%	31.80	24.90	38.42	4.88		1.96	53.56	26.97	17.51						
<b>Mediana</b>	7.42	825.00	0.60	0.70	1.25	0.23	6.33	0.00	2.85	1.45	0.81	6.51	1.84	438.21	1476.00	942.00	
		ppm	12.03	8.51	28.74	8.99		0.00	173.91	51.41	38.87						15.93
		mmol L <sup>-1</sup>	1.20	1.40	1.25	0.23		0.00	2.85	1.45	0.41						
		%	31.99	27.32	31.25	4.71		0.00	57.11	29.03	7.45						
<b>Varianza</b>	0.57		6.23	1.65	25.48	0.11	21.38	0.12	15.38	1.21	0.75	23.12	1.17				
<b>Desvest</b>	0.75		2.50	1.28	5.05	0.34	4.62	0.35	3.92	1.10	0.87	4.81	1.08				

### 5.1.6 Clasificación urbana

Se obtuvo la concentración iónica de las tres muestras clasificadas para este uso de suelo y vegetación (ver Cuadro 5-6), mismas que en conjunto, presentan una media de pH de 7.30, sumatoria de cationes de 2.88 mEq L<sup>-1</sup> y aniones de 3.01 mEq L<sup>-1</sup>, el porcentaje de error para esta clasificación es de 2.64 y se clasifica como aguas intermedias al no existir iones dominantes, la mayor tendencia a variar por debajo o encima es para el ion calcio con 2.15 mEq L<sup>-1</sup> entre muestras y el ion con menor tendencia a variar es el potasio con 0.17 mEq L<sup>-1</sup> entre muestras. La mediana en cationes fue de 1.53 mEq L<sup>-1</sup> y aniones de 1.64 mEq L<sup>-1</sup>. Es necesario mencionar que, para esta clasificación, las muestras de agua no presentaron el ion sodio ni el ion carbonato en su concentración.

Cuadro 5-6. Concentración iónica de tres sitios de muestreos clasificadas como urbano

Sitio de muestreo	pH	CE μS/cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ Cationes	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ Aniones	% Error	Σppm Σmmol L <sup>-1</sup>	RSE mg L <sup>-1</sup>	RSC mg L <sup>-1</sup>
			mmolc L <sup>-1</sup>					mmolc L <sup>-1</sup>							RSE mg L <sup>-1</sup>	RSC mg L <sup>-1</sup>
1	6.74	159.8	0.80	0.35	0.00	0.38	1.53	0.00	0.50	0.40	0.74	1.64	3.48	115.39	214.00	170
		ppm	16.03	4.25	0.00	14.86		0.00	30.51	14.18	35.55					
		mmol L <sup>-1</sup>	1.60	0.70	0.00	0.38		0.00	0.50	0.40	0.37					
		%	52.29	22.88	0.00	24.84		0.00	30.48	24.39	45.13					
2	7.48	744.5	4.30	1.70	0.00	0.22	6.22	0.00	3.80	1.70	0.95	6.45	1.84	453.37	536.00	400
		ppm	86.17	20.66	0.00	8.60		0.00	231.88	60.27	45.80					
		mmol L <sup>-1</sup>	8.60	3.40	0.00	0.22		0.00	3.80	1.70	0.48					
		%	69.13	27.33	0.00	3.54		0.00	58.88	26.34	14.78					
3	7.69	72	0.40	0.45	0.00	0.05	0.90	0.00	0.54	0.36	0.04	0.94	2.59	63.00	72.00	30
		ppm	8.02	5.47	0.00	1.76		0.00	32.95	12.76	2.05					
		mmol L <sup>-1</sup>	0.80	0.90	0.00	0.05		0.00	0.54	0.36	0.02					
		%	44.69	50.28	0.00	5.03		0.00	57.28	38.19	4.53					
Media	7.30	325.43	1.83	0.83	0.00	0.22	2.88	0.00	1.61	0.82	0.58	3.01	2.64	210.59	375.00	214.00
		ppm	36.74	10.13	0.00	8.41		0.00	98.45	29.07	27.80					
		mmol L <sup>-1</sup>	3.67	1.67	0.00	0.22		0.00	1.61	0.82	0.29					
		%	55.37	33.50	0.00	11.13		0.00	48.88	29.64	21.48					
Mediana	7.48	159.80	0.80	0.45	0.00	0.22	1.53	0.00	0.54	0.40	0.74	1.64	2.59	115.39	170.00	30.00
		ppm	16.03	5.47	0.00	8.60		0.00	32.95	14.18	35.55					
		mmol L <sup>-1</sup>	1.60	0.90	0.00	0.22		0.00	0.54	0.40	0.37					
		%	52.29	27.33	0.00	5.03		0.00	57.28	26.34	14.78					
Varianza	0.25		4.60	0.57	0.00	0.03	8.46	0.00	3.59	0.58	0.23	9.00	0.67			
Desvest	0.50		2.15	0.75	0.00	0.17	2.91	0.00	1.89	0.76	0.48	3.00	0.82			

### 5.1.7 Clasificación vegetación secundaria

Se obtuvo la concentración iónica de las seis muestras clasificadas para este uso de suelo y vegetación (ver Cuadro 5-7), mismas que en conjunto, presentan una media de pH de 8.21, sumatoria de cationes de 8.06 mEq L<sup>-1</sup> y aniones de 7.82 mEq L<sup>-1</sup>, así mismo, el porcentaje de error para esta clasificación es de 2.63 y se clasifica como aguas de bicarbonato calcio de magnesio sodio (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, Mg<sup>2+</sup> y Na<sup>+</sup>). Para esta clasificación se encontraron relaciones similares entre muestras con base en la varianza y en la desviación estándar, mismas que indican poca tendencia a variar, el ion bicarbonato presenta la mayor tendencia con 2.08 mEq L<sup>-1</sup> entre muestras, seguido por el ion magnesio con 1.31 mEq L<sup>-1</sup> entre muestras, los iones que menor tendencia a variar presentaron fue el ion sulfato y el ion calcio con 0.11 y 0.22 mEq L<sup>-1</sup> entre muestras respectivamente. La mediana en la sumatoria de cationes es de 7.40 y en aniones de 7.05, es necesario mencionar que, para esta clasificación, el ion cloro no se presentó en ninguna de las concentraciones de las muestras de agua.

Cuadro 5-7. Concentración iónica de seis sitios de muestreos clasificadas vegetación secundaria

Sitio de muestreo	pH	CE μS/cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ Cationes	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ Aniones	% Error	Σppm Σmmol L <sup>-1</sup>	RSE mg L <sup>-1</sup>	RSC mg L <sup>-1</sup>
			mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>					mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>							RSE mg L <sup>-1</sup>	RSC mg L <sup>-1</sup>
1	8.00	915	1.00	4.50	2.80	0.83	9.13	3.00	5.50	0.00	0.30	8.80	1.86	582.10	578.00	422.00
		ppm	30.00	274.59	99.26	39.77		60.12	66.83	0.00	11.53				25.51	
		mmol L <sup>-1</sup>	0.50	4.50	2.80	0.41		6.00	11.00	0.00	0.30					
		%	10.96	49.30	30.67	9.07	34.11	62.54	0.00	3.35						
2	8	1051.5	0.70	5.55	3.00	1.05	10.30	3.00	6.60	0.00	0.07	9.67	3.17	659.68	596.00	436.00
		ppm	21.00	338.66	106.35	50.62		60.12	80.19	0.00	2.74				28.70	
		mmol L <sup>-1</sup>	0.35	5.55	3.00	0.53		6.00	13.20	0.00	0.07					
		%	6.79	53.86	29.12	10.23	31.02	68.25	0.00	0.72						
3	8.18	796	0.80	4.20	1.70	1.03	7.73	2.50	4.85	0.00	0.05	7.40	2.17	500.94	542.00	410.00
		ppm	24.00	256.28	60.27	49.41		50.10	58.93	0.00	1.95				21.56	
		mmol L <sup>-1</sup>	0.40	4.20	1.70	0.51		5.00	9.70	0.00	0.05					
		%	10.35	54.34	22.00	13.31	33.78	65.54	0.00	0.68						
4	8.61	672.5	1.00	2.90	2.25	0.91	7.06	2.05	4.65	0.00	0.00	6.70	2.64	428.17	428.00	324.00
		ppm	30.00	176.96	79.76	43.87		41.08	56.50	0.00	0.00				19.51	
		mmol L <sup>-1</sup>	0.50	2.90	2.25	0.46		4.10	9.30	0.00	0.00					
		%	14.16	41.06	31.85	12.93	30.60	69.40	0.00	0.00						

Sitio de muestreo	pH	CE $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	$\Sigma$ Cationes	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	$\Sigma$ Aniones	% Error	$\Sigma$ ppm $\Sigma$ mmol L <sup>-1</sup>	RSE mg L <sup>-1</sup> RSC mg L <sup>-1</sup>
			mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>					mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>							
5	8.28	691.5	0.80	4.10	0.90	0.29	6.09	4.20	2.30	0.00	0.01	6.51	3.31		394.00
		ppm	24.00	250.18	31.91	13.86		84.17	27.95	0.00	0.20			432.27	306.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.40	4.10	0.90	0.14		8.40	4.60	0.00	0.01			18.55	
		%	13.14	67.34	14.78	4.74		64.57	35.36	0.00	0.08				
6	8.48	371.9	0.40	1.80	0.60	0.30	3.10	2.05	1.05	0.00	0.01	3.11	0.12		226.00
		ppm	12.00	109.84	21.27	14.52		41.08	12.76	0.00	0.39			211.86	164.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.20	1.80	0.60	0.15		4.10	2.10	0.00	0.01			8.96	
		%	12.90	58.02	19.34	9.75		65.92	33.76	0.00	0.32				
Media	8.21	825.30	0.86	4.25	2.13	0.82	8.06	2.95	4.78	0.00	0.09	7.82	2.63		507.60
		ppm	25.80	259.33	75.51	39.51		59.12	58.08	0.00	3.28			520.63	379.60
		mmol L <sup>-1</sup>	0.43	4.25	2.13	0.41		5.90	9.56	0.00	0.09			22.77	
		%	11.08	53.18	25.68	10.06		38.82	60.22	0.00	0.97				
Mediana	8.23	743.75	0.80	4.15	1.98	0.87	7.40	2.75	4.75	0.00	0.03	7.05	2.41		485.00
		ppm	24.00	253.23	70.02	41.82		55.11	57.72	0.00	1.17			466.61	367.00
		mmol L <sup>-1</sup>	0.40	4.15	1.98	0.44		5.50	9.50	0.00	0.03			20.54	
		%	11.93	54.10	25.56	9.99		33.95	64.04	0.00	0.50				
Varianza	0.06		0.05	1.72	0.97	0.12	6.33	0.65	4.32	0.00	0.01	5.20	1.36		
Desvest	0.25		0.22	1.31	0.99	0.35	2.52	0.81	2.08	0.00	0.11	2.28	1.17		

## Clasificación de las aguas con base en su salinidad

Con la finalidad de identificar y verificar los resultados de las composiciones iónicas de cada muestra con base en la salinidad que presentan, se establecen diferentes relaciones de las determinaciones. Para la presente investigación, no se encontró diferencias entre ambas conductividades, al igual que Juárez 2015 y Torres 2018, donde obtuvieron las mismas variaciones.

### 5.2 Relación entre la conductividad eléctrica teórica y la experimental

Cuando se investigan soluciones salinas, ya sean en aguas naturales, aguas de los suelos, aguas freáticas y aguas subterráneas, se recomienda medir la CE de estas soluciones, expresada en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

Las concentraciones de sales solubles en aguas superficiales y subterráneas se pueden determinar a través de mediciones de la CE de las soluciones, para ello se cuenta con dos relaciones funcionales:  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1} = f_a \text{ CE}$  y  $\text{mg L}^{-1} = f_a \text{ CE}$ . Cuando se determina la concentración de sales expresada en  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$ , la CE depende del número de iones en solución; en cambio, cuando es necesario determinar los miligramos por litro o partes por millón ( $\text{mg L}^{-1}$  o ppm), la CE depende del número de partículas en la solución y del peso de las partículas.

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

La obtención de la CE teórica se determinó mediante la multiplicación de cada ion ( $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ) por un factor de acuerdo con lo establecido por Eaton *et al.*, (1995), las sumas totales de los resultados corresponden al valor de la CE.

Para esta relación se obtuvieron los datos analíticos de la CE teórica y experimental por clasificación de uso de suelo para las muestras de agua, donde se encontró que todas las muestras fueron correctamente determinadas, como se muestra a continuación:

### 5.2.1 Clasificación agrícola

En la Figura 5-1, se observa la relación entre las conductividades eléctricas para las 27 muestras clasificadas en éste uso de suelo y vegetación, con base en  $R^2$ , nos indica que existe una buena relación entre muestras para la ecuación lineal que se presenta.

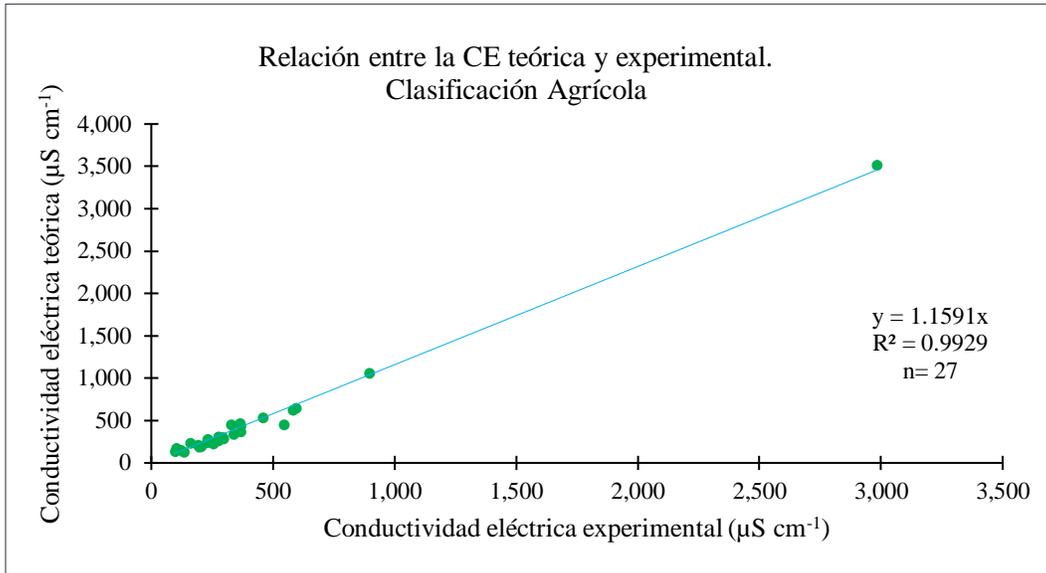


Figura 5-1. Relación de CE teórica y experimental para la clasificación de uso de suelo agrícola

### 5.2.2 Clasificación bosque

En la Figura 5-2, se observa la relación entre las conductividades eléctricas para las cuatro muestras de aguas clasificadas en éste uso de suelo y vegetación, con base en  $R^2$ , nos indica que existe una excelente relación entre muestras para la ecuación lineal que se presenta.

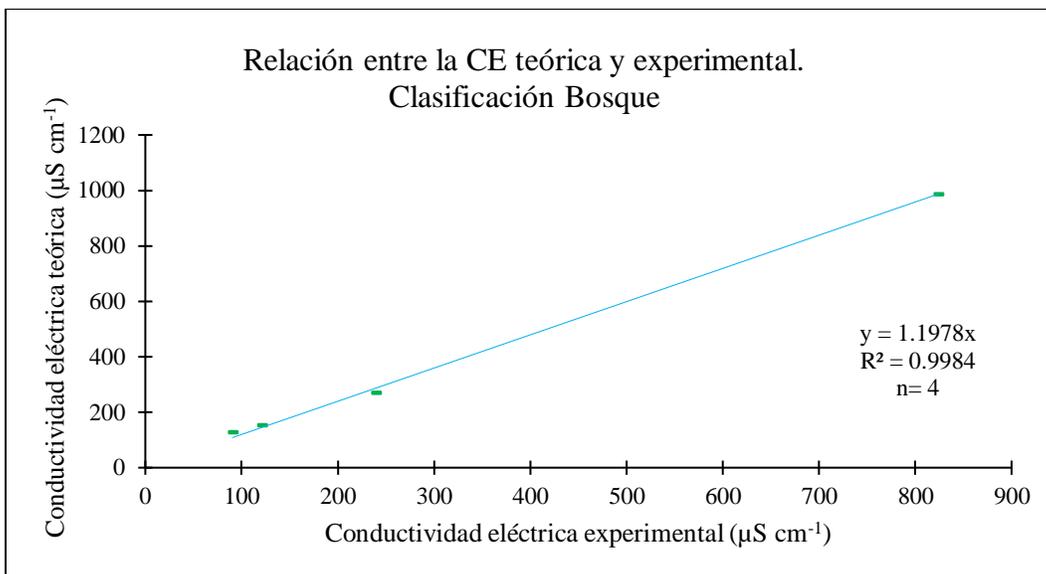


Figura 5-2. Relación de CE teórica y experimental para la clasificación de uso de suelo bosque

### 5.2.3 Clasificación Lagos cráter

En la Figura 5-3, se observa la relación entre las conductividades eléctricas para las seis muestras de aguas clasificadas en éste uso de suelo y vegetación, con base en  $R^2$ , nos indica que existe una excelente relación entre muestras para la ecuación lineal que se presenta.

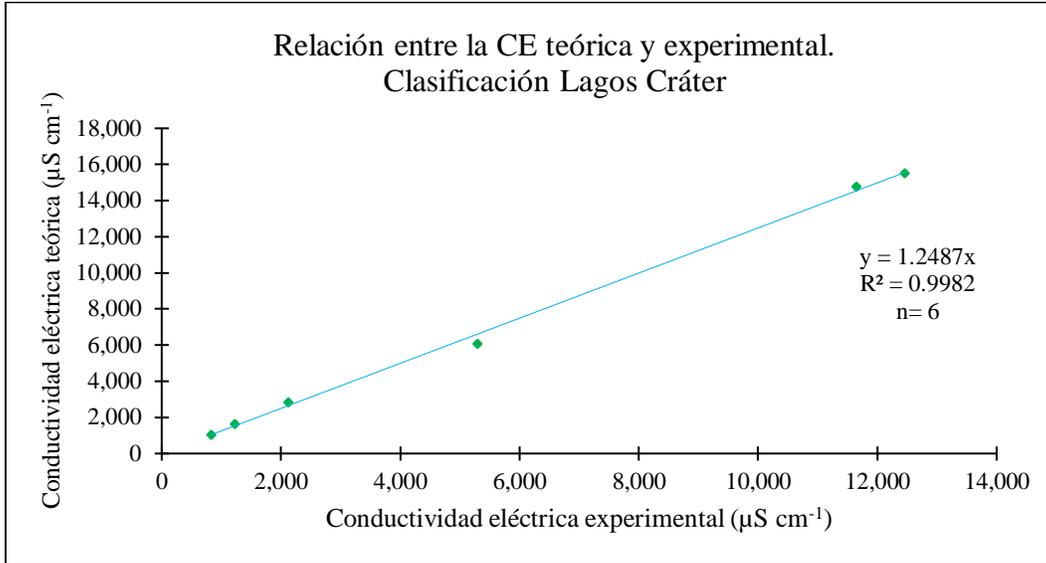


Figura 5-3. Relación de CE entre teórica y experimental para la clasificación de uso de suelo Lagos cráter

### 5.2.4 Clasificación Las Salinas

En la Figura 5-4, se observa la relación entre las conductividades eléctricas para las 47 muestras de aguas clasificadas en éste uso de suelo y vegetación, con base en  $R^2$ , nos indica que existe una excelente relación entre muestras para la ecuación lineal que se presenta.

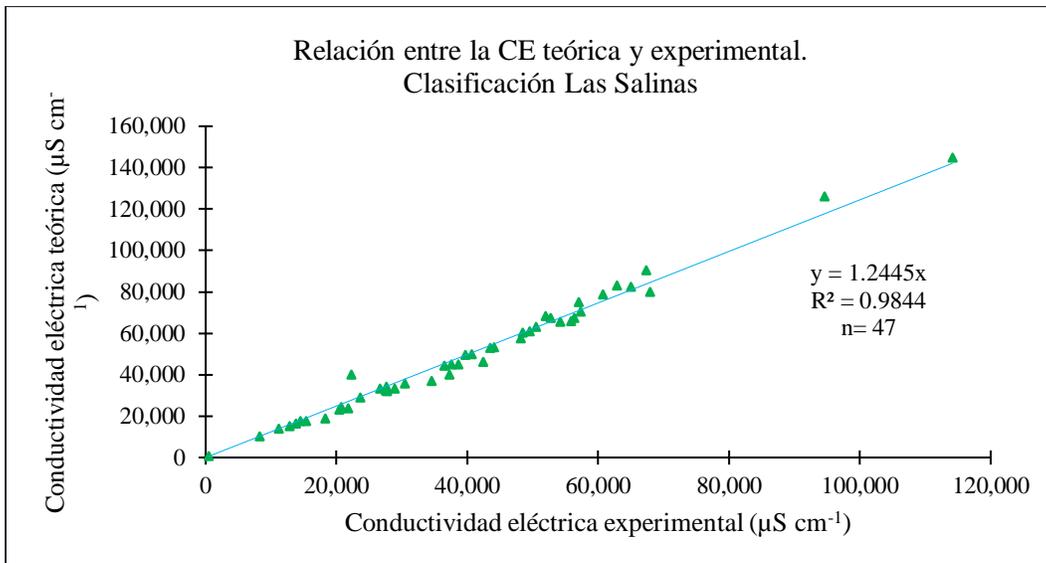


Figura 5-4. Relación de CE entre teórica y experimental para la clasificación de uso de suelo Las Salinas

### 5.2.5 Clasificación Pastizal

En la Figura 5-5, se observa la relación entre las conductividades eléctricas para las cuatro muestras de aguas clasificadas en éste uso de suelo y vegetación, con base en  $R^2$ , nos indica que existe una buena relación entre muestras para la ecuación lineal que se presenta.

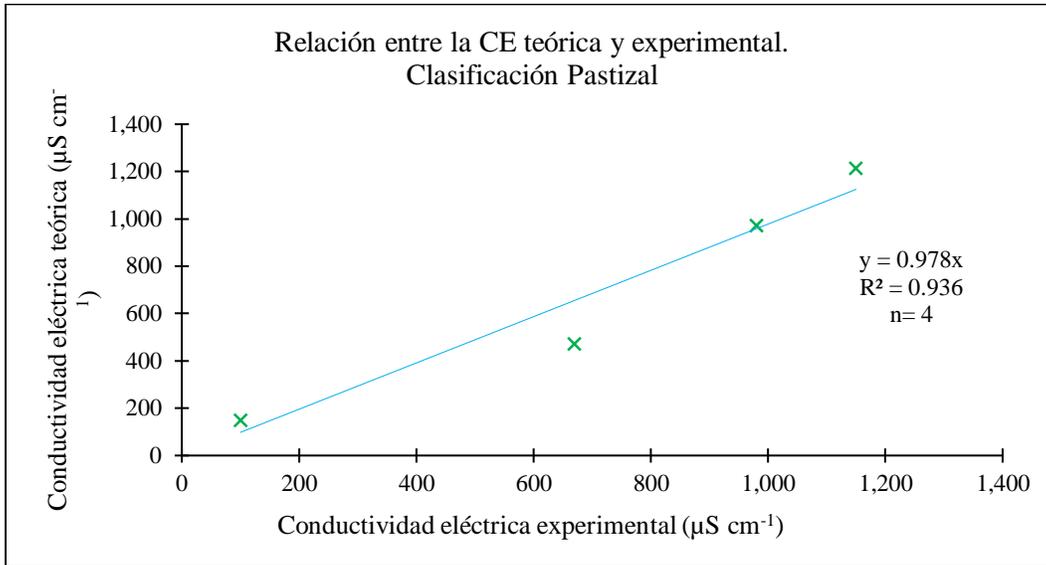


Figura 5-5. Relación de CE entre teórica y experimental para la clasificación de uso de suelo Pastizal

### 5.2.6 Clasificación Urbano

En la Figura 5-6, se observa la relación entre las conductividades eléctricas para las tres muestras de aguas clasificadas en éste uso de suelo y vegetación, con base en  $R^2$ , nos indica que existe una excelente relación entre muestras para la ecuación lineal que se presenta.

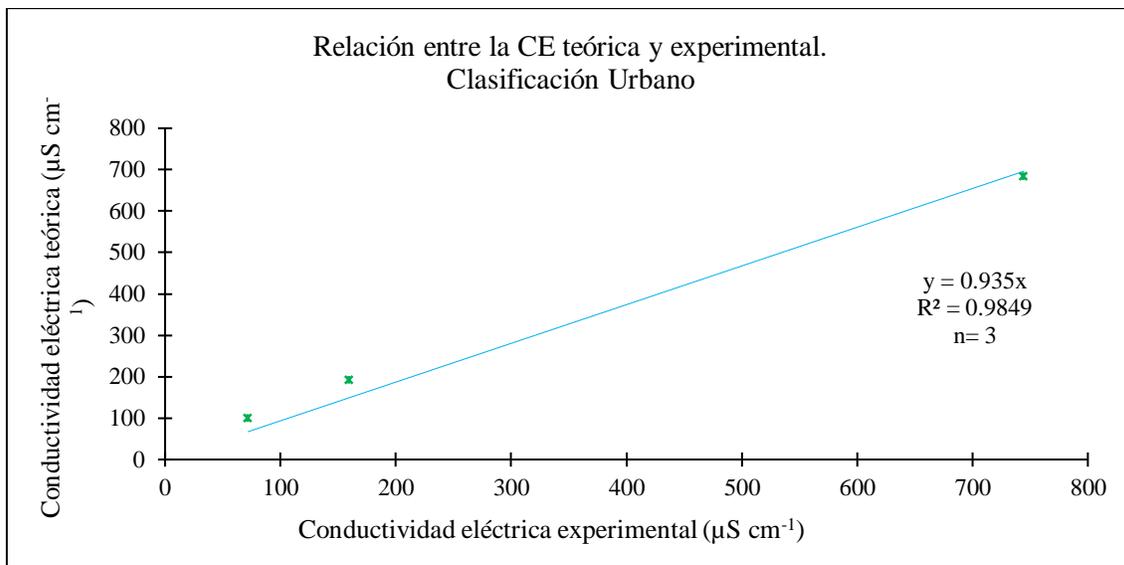


Figura 5-6. Relación de CE entre teórica y experimental para la clasificación de uso de suelo Urbano

### 5.2.7 Clasificación Vegetación Secundaria.

En la Figura 5-7, se observa la relación entre las conductividades eléctricas para las seis muestras de aguas clasificadas en éste uso de suelo y vegetación, con base en  $R^2$ , nos indica que existe una excelente relación entre muestras para la ecuación lineal que se presenta.

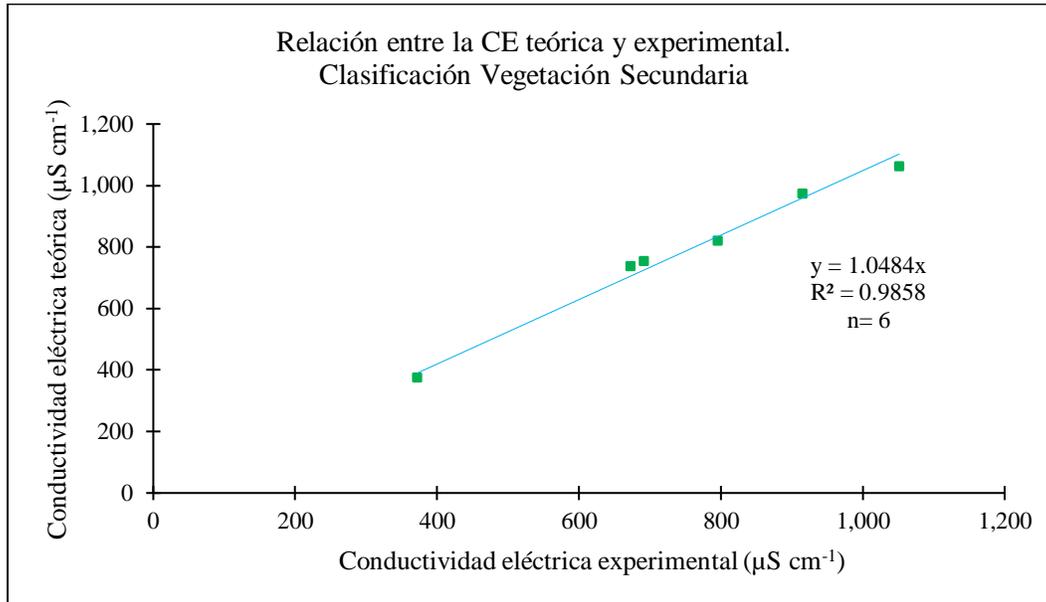


Figura 5-7. Relación de CE entre teórica y experimental para la clasificación de uso de suelo vegetación secundaria.

### 5.3 Relación entre la suma de cationes y aniones ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ), con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ).

Las propiedades de las soluciones salinas, aguas naturales superficiales y subterráneas, y de los suelos, las mediciones de la CE (en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) de las diferentes soluciones acuosas están en función directamente proporcional a la concentración de cationes o de aniones (en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ). Es necesario mencionar que la electro-neutralidad siempre se deberá observar. Conocer los valores de la relación funcional de cationes o de aniones con respecto a la CE ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1} = f \text{a CE}$ ), 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 (Eaton *et al.*, 1995).

Las relaciones se exponen a continuación mediante la clasificación de las muestras, en donde se observan los porcentajes de error dentro del intervalo permisible, indicando los valores de las determinaciones analíticas de la investigación correctas.

### 5.3.1 Clasificación agrícola.

En la Figura 5-8 y 5-9, se observa la relación entre la concentración de cationes y aniones con base en la CE, respectivamente, ambas funciones establecen excelente relación entre muestras (con base en  $R^2$ ), la diferencia entre ambas pendientes es de 0.002 unidades, el resultado es una buena relación de aniones y cationes con respecto a la CE

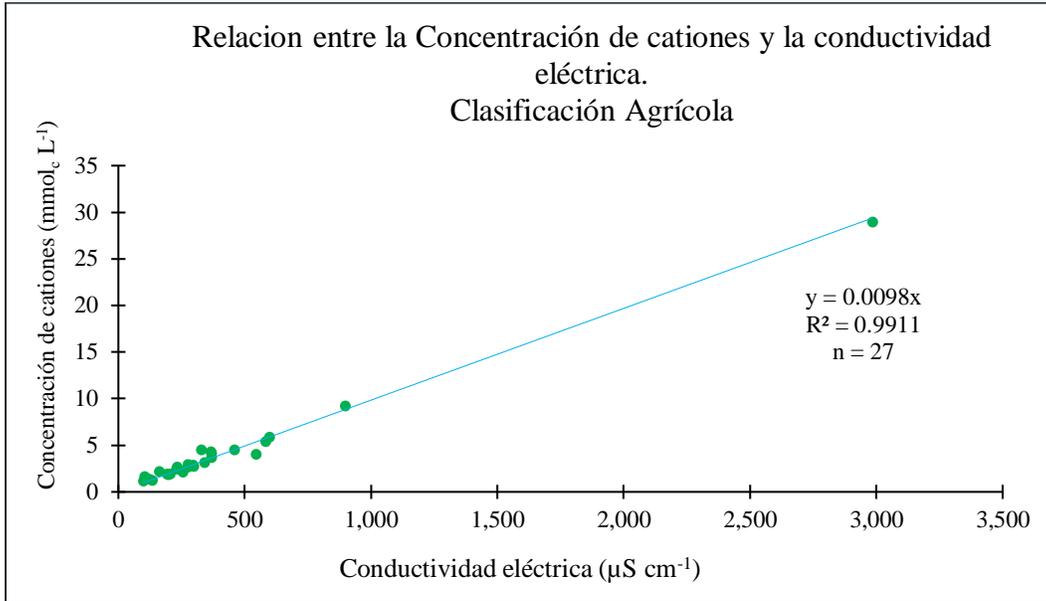


Figura 5-8. Relación entre concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Clasificación agrícola

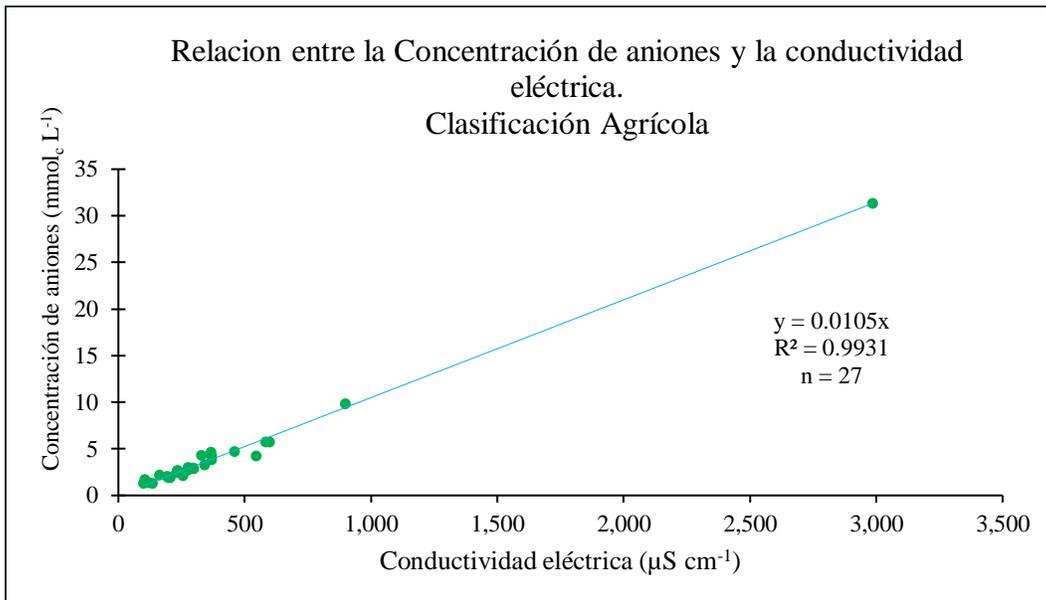


Figura 5-9. Relación entre concentración de aniones ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Clasificación agrícola.

### 5.3.2 Clasificación bosque.

En la Figura 5-10 y 5-11, se observa la relación entre la concentración de cationes y aniones con base en la CE, respectivamente, ambas funciones establecen excelente relación entre muestras (con base en  $R^2$ ), la diferencia entre ambas pendientes es de 0.0009 unidades, el resultado es una excelente relación de aniones y cationes con respecto a la CE

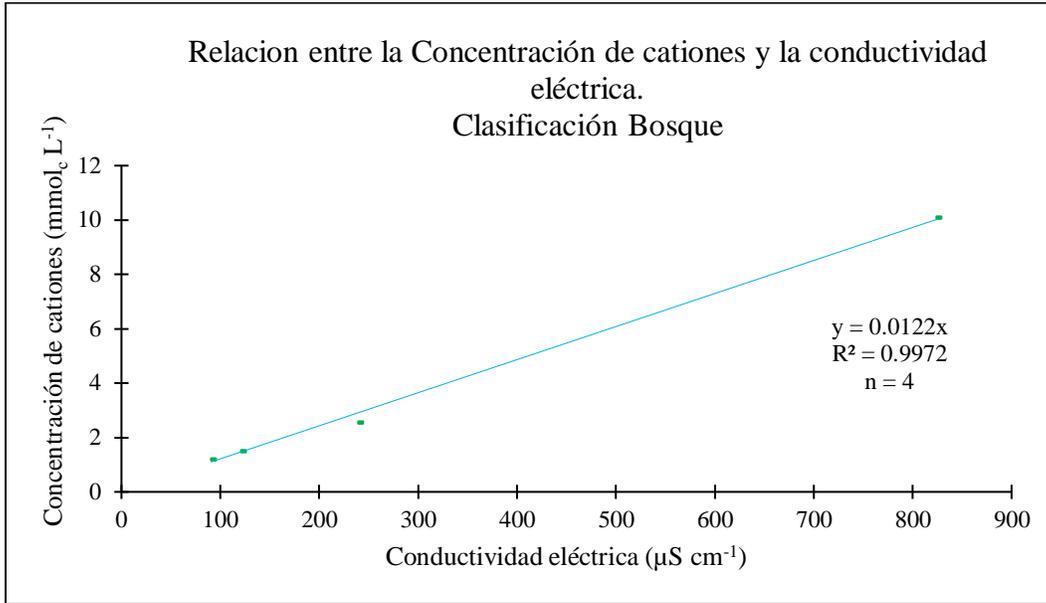


Figura 5-10. Relación entre concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Clasificación bosque.

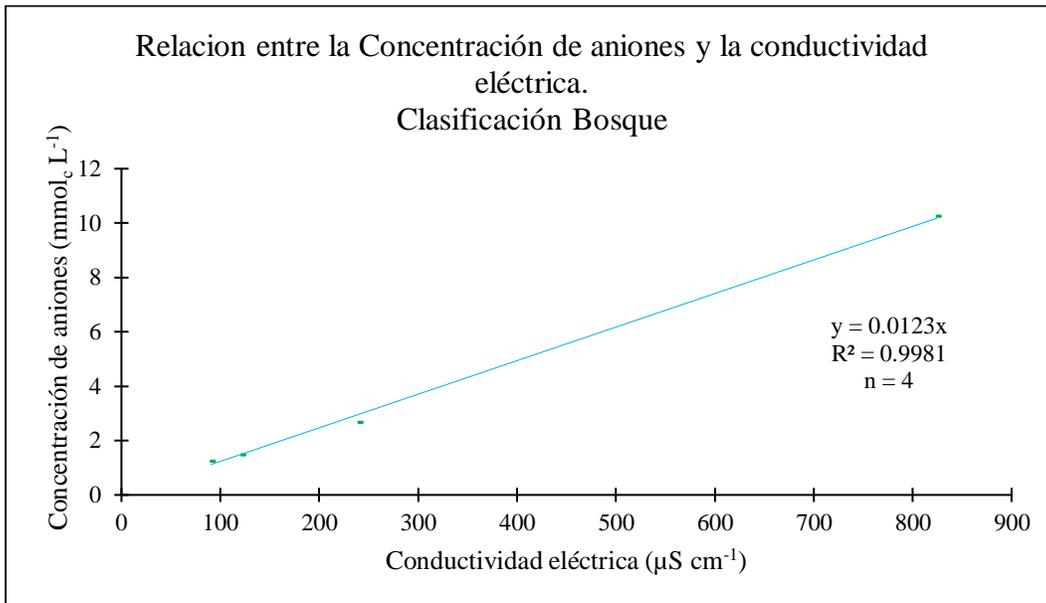


Figura 5-11. Relación entre concentración de aniones ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Clasificación bosque.

### 5.3.3 Clasificación Lagos Cráter.

En la Figura 5-12 y 5-13, se observa la relación entre la concentración de cationes y aniones con base en la CE, respectivamente, ambas funciones establecen excelente relación entre muestras (con base en  $R^2$ ), la diferencia entre ambas pendientes es de 0.0004 unidades, el resultado es una excelente relación de aniones y cationes con respecto a la CE

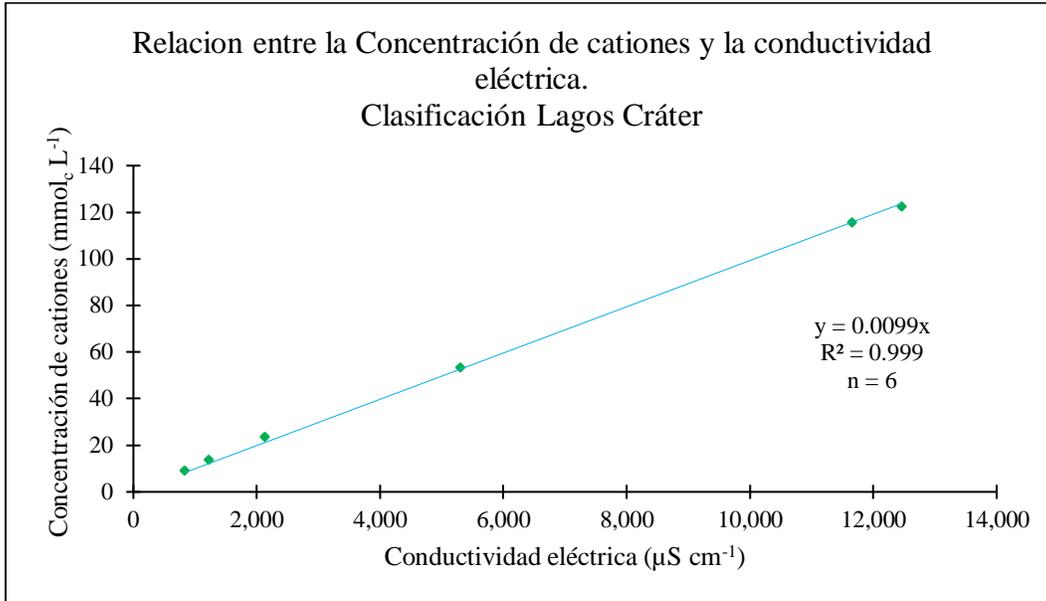


Figura 5-12. Relación entre concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Clasificación Lagos Cráter.

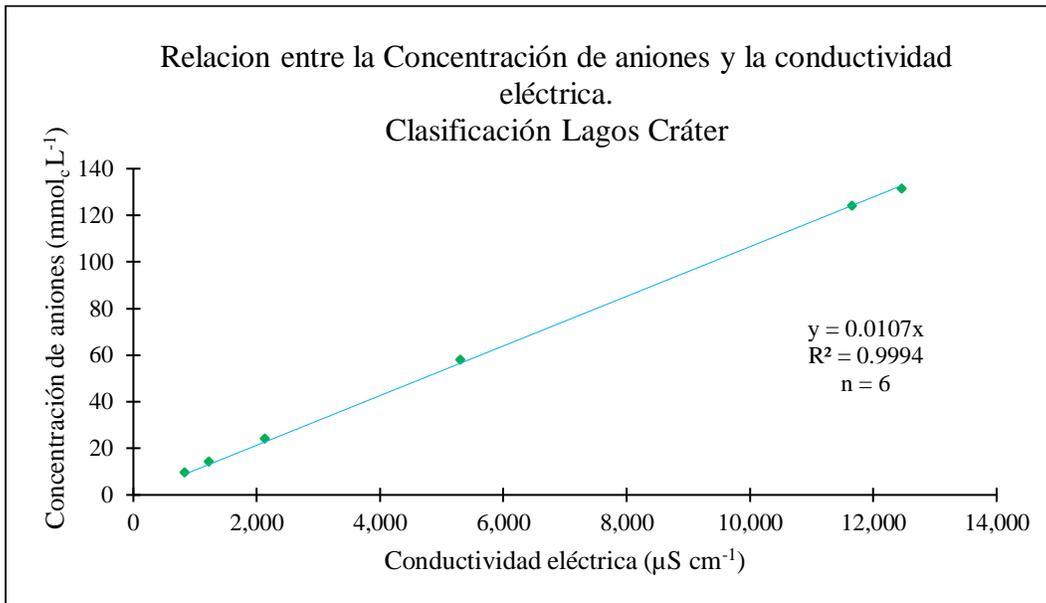


Figura 5-13. Relación entre la concentración de aniones ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Clasificación Lagos Cráter

### 5.3.4 Clasificación Las Salinas.

En la Figura 5-14 y 5-15, se observa la relación entre la concentración de cationes y aniones con base en la CE, respectivamente, ambas funciones establecen excelente relación entre muestras (con base en  $R^2$ ), la diferencia entre ambas pendientes es de 0.0023 unidades, el resultado es una buena relación de aniones y cationes con respecto a la CE

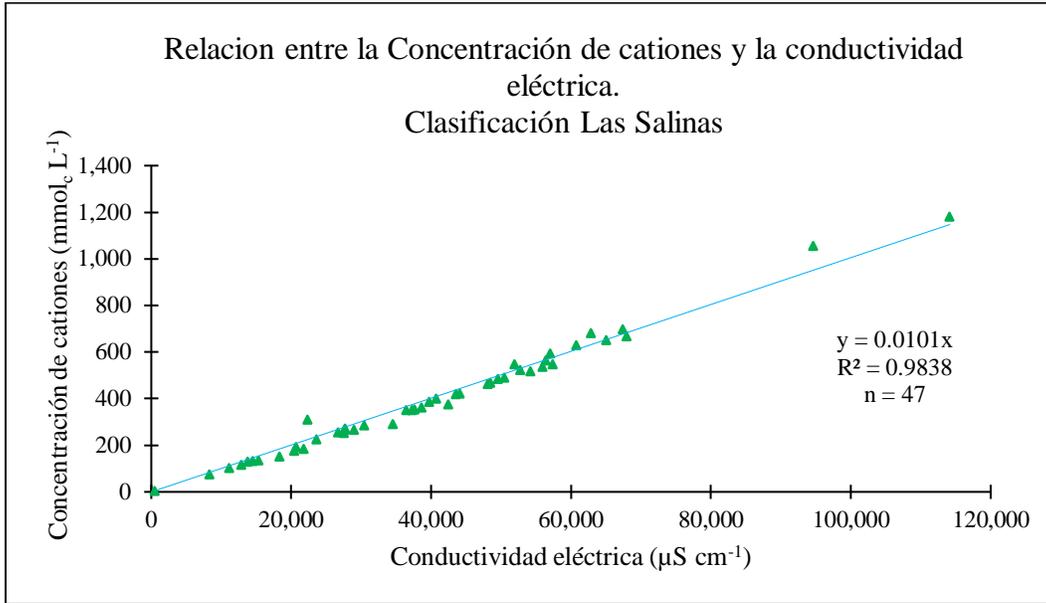


Figura 5-14. Relación entre concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Clasificación Las Salinas

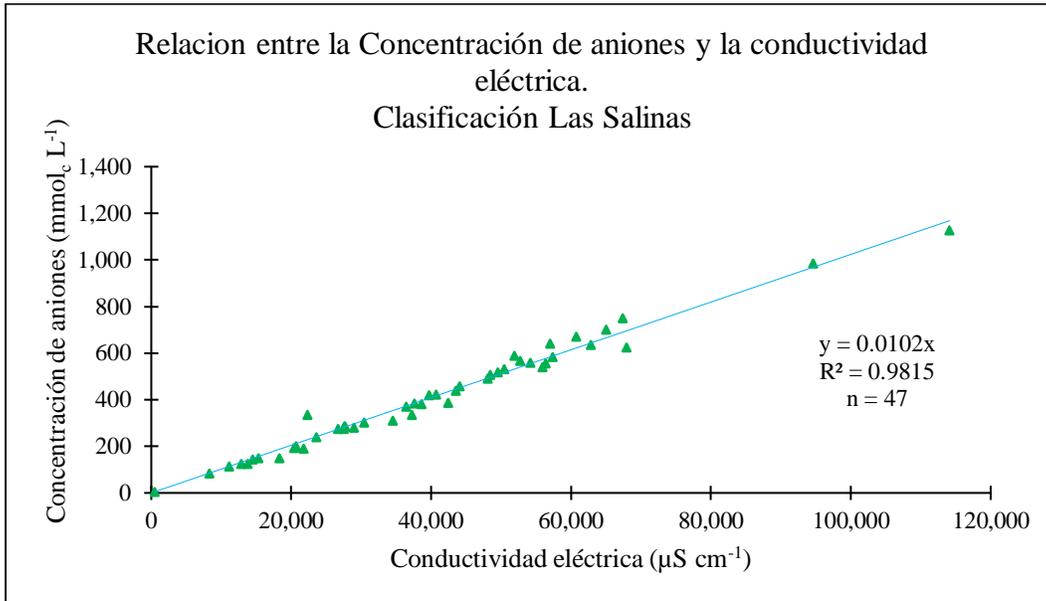


Figura 5-15. Relación entre concentración de aniones ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Clasificación Las Salinas

### 5.3.5 Clasificación Pastizal.

En la Figura 5-16 y 5-17 se observa la relación entre la concentración de cationes y aniones con base en la CE, respectivamente, ambas funciones establecen excelente relación entre muestras (con base en  $R^2$ ), la diferencia entre ambas pendientes es de 0.0074 unidades, el resultado es una buena relación de aniones y cationes con respecto a la CE.

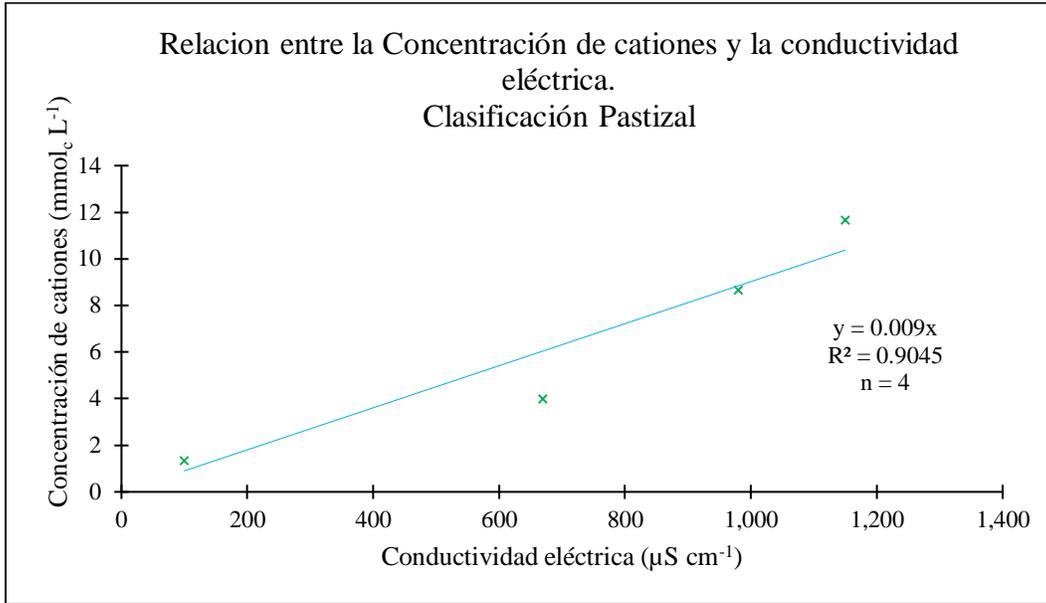


Figura 5-16. Relación entre concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Clasificación Pastizal

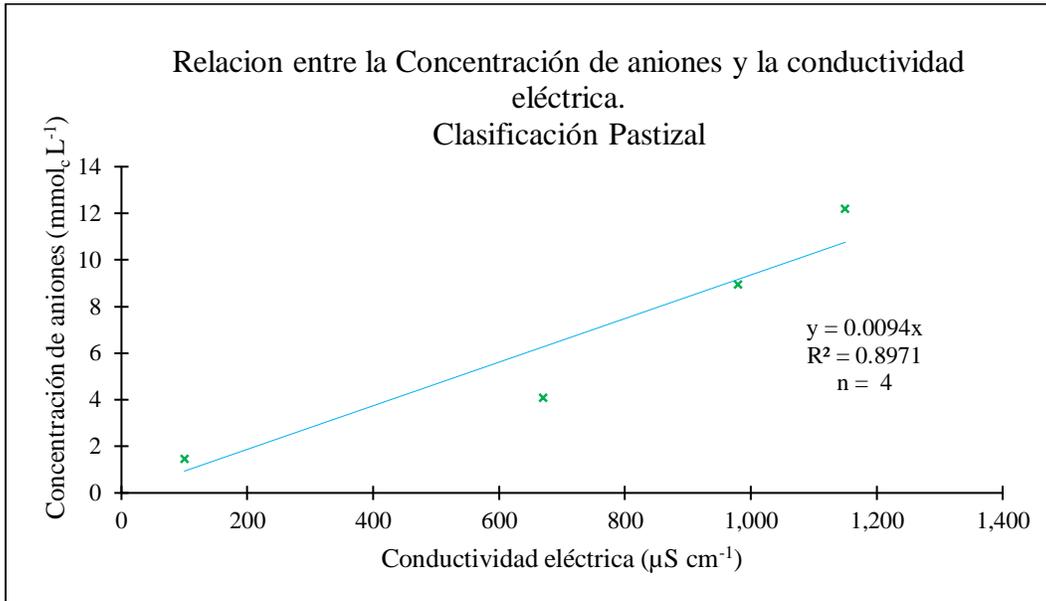


Figura 5-17. Relación entre concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Clasificación pastizal

### 5.3.6 Clasificación Urbano.

En la Figura 5-18 y 5-19 se observa la relación entre la concentración de cationes y aniones con base en la CE, respectivamente, ambas funciones establecen excelente relación entre muestras (con base en  $R^2$ ), la diferencia entre ambas pendientes es de 0.0018 unidades, el resultado es una relación de aniones y cationes con respecto a la CE.

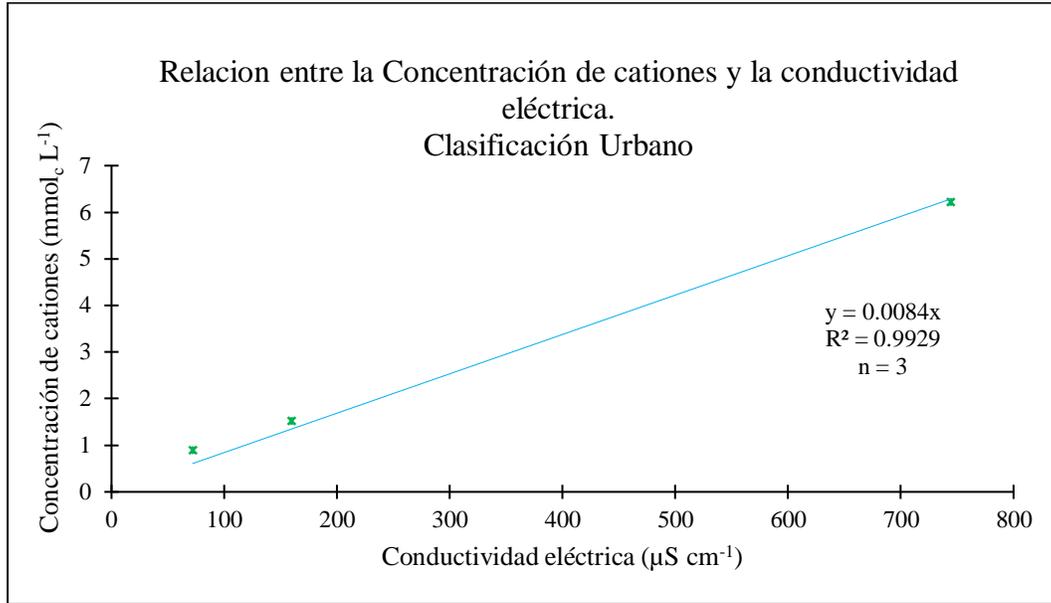


Figura 5-18. Relación entre concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Clasificación urbano

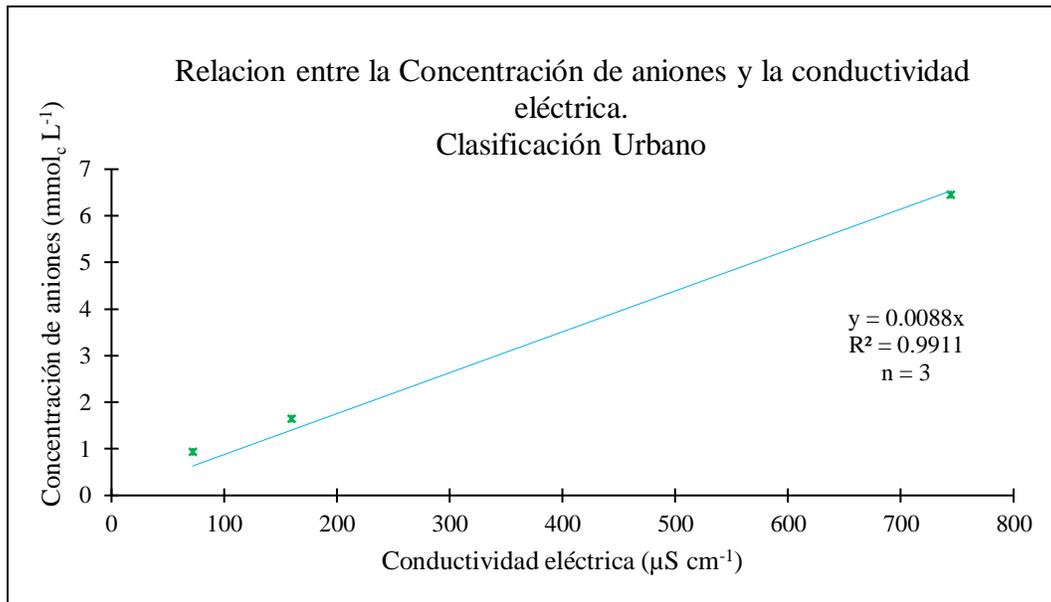


Figura 5-19. Relación entre concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Clasificación urbano

### 5.3.7 Clasificación Vegetación secundaria.

En la Figura 5-20 y 5-21 se observa la relación entre la concentración de cationes y aniones con base en la CE, respectivamente, ambas funciones establecen excelente relación entre muestras (con base en  $R^2$ ), la diferencia entre ambas pendientes es de 0.0168 unidades, el resultado es una buena relación de aniones y cationes con respecto a la CE.

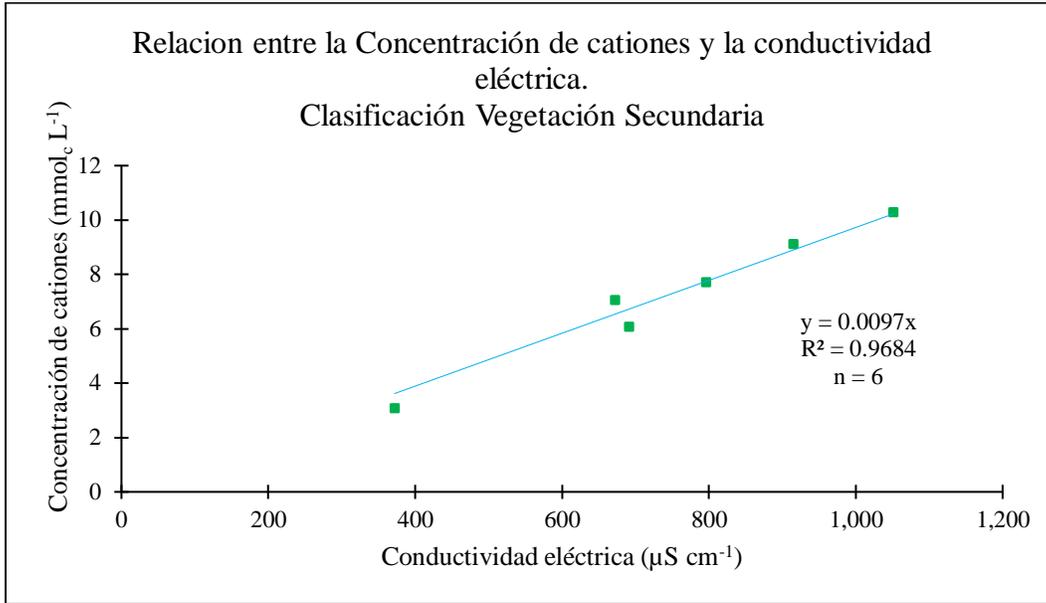


Figura 5-20. Relación entre concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Clasificación vegetación secundaria

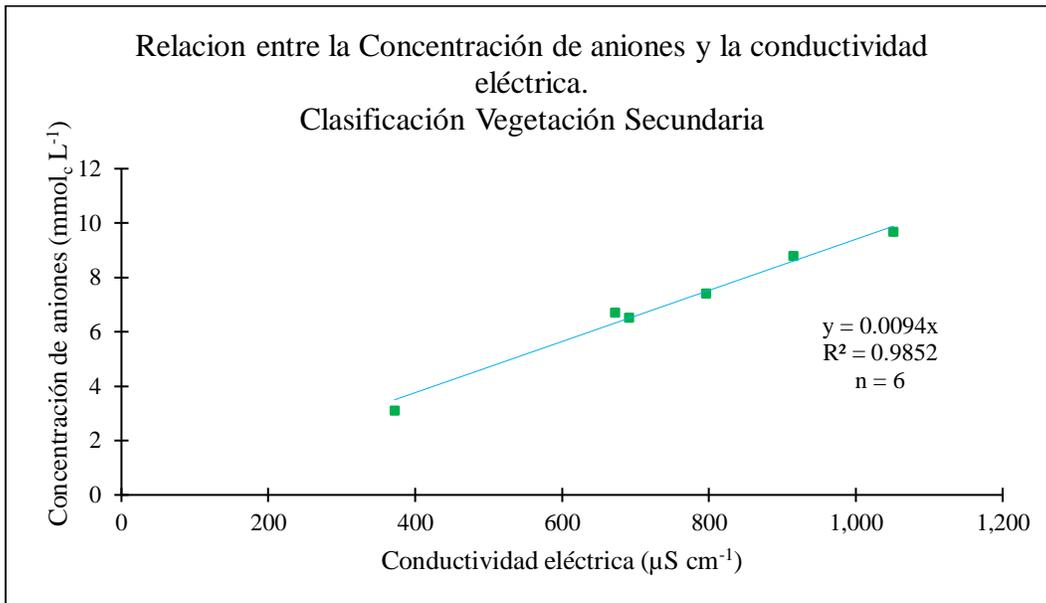


Figura 5-21. Relación entre concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con respecto a la CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Clasificación vegetación secundaria

#### 5.4 Relación entre la concentración de sales ( $\text{mg L}^{-1}$ ) y CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )

Como se ha señalado por diferentes autores (Richards 1990) en investigaciones específicas sobre numerosas determinaciones de la CE (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 CE son directamente proporcionales a los pesos de las sales disociadas. También se ha hecho hincapié que esta relación funcional  $\text{mg L}^{-1} = f \text{a CE}$ , en su proporcionalidad depende de la pendiente, cuyos valores que adquiere dependen del tipo de salinidad.

Para la presente investigación, el comportamiento de la relación de las aguas naturales es similar al encontrado por Valdez (2015), quien considera al agua natural como un mal conductor de la electricidad, pero cuando contiene sales disueltas o sólidos totales, puede conducirla en forma proporcional a la cantidad de sales presentes.

Las relaciones entre las concentraciones de sales y la CE, se observan a continuación mediante la clasificación de las muestras, en donde se observan determinaciones correctas con base en la representatividad del valor obtenido para el ajuste lineal ( $R^2$ ), de cada relación obtenida.

##### 5.4.1 Clasificación Agrícola

En la Figura 5-22, se observa una excelente relación entre la concentración de sales y la CE, con base en  $R^2$  con valor de 0.967, misma que es muy próxima a tener el valor a 1, dicho valor nos indica una correcta determinación de la concentración de sales.

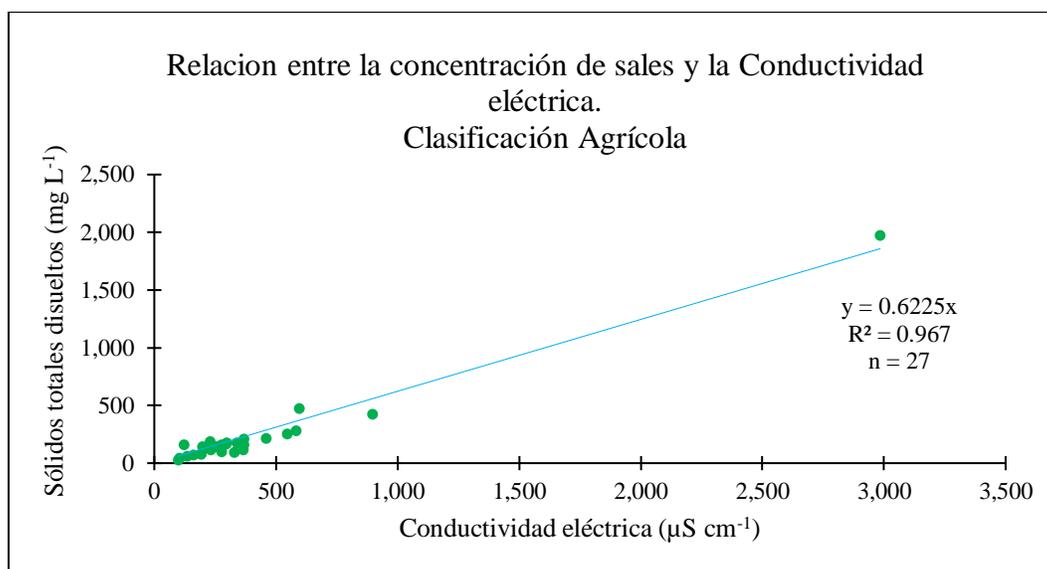


Figura 5-22. Relación entre la concentración de sales y la CE. Clasificación agrícola

### 5.4.2 Clasificación Bosque

En la Figura 5-23, se observa una excelente relación entre la concentración de sales y la CE, con base en  $R^2$  con valor de 0.9125, misma que es muy próxima a tener el valor a 1, dicho valor nos indica una correcta determinación de la concentración de sales.

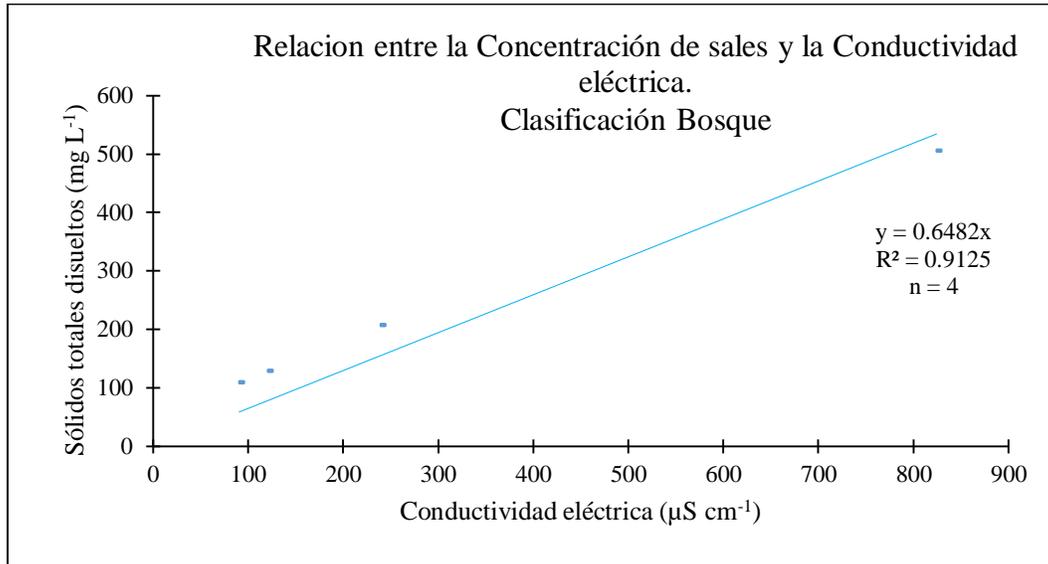


Figura 5-23. Relación entre la concentración de sales y la CE. Clasificación bosque

### 5.4.3 Clasificación Lagos Cráter

En la Figura 5-24, se observa una excelente relación entre la concentración de sales y la CE, con base en  $R^2$  con valor de 0.9975, misma que es muy próxima a tener el valor a 1, dicho valor nos indica una correcta determinación de la concentración de sales.

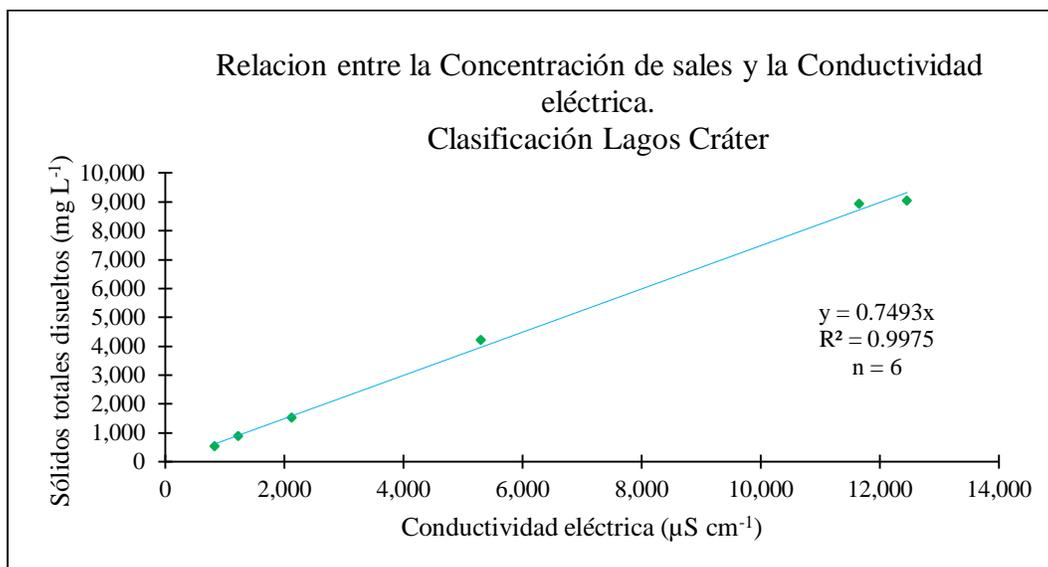


Figura 5-24. Relación entre la concentración de sales y la CE. Clasificación Lagos Cráter

#### 5.4.4 Clasificación Las Salinas

En la Figura 5-25, se observa una excelente relación entre la concentración de sales y la CE, con base en  $R^2$  con valor de 0.982, misma que es muy próxima a tener el valor a 1, dicho valor nos indica una correcta determinación de la concentración de sales.

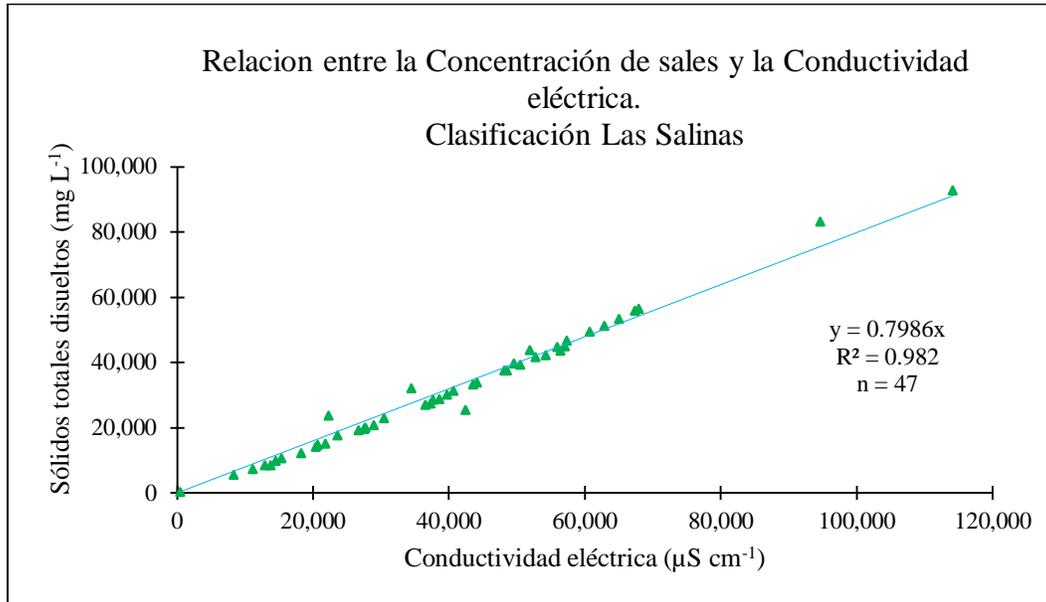


Figura 5-25. Relación entre la concentración de sales y la CE. Clasificación Las Salinas

#### 5.4.5 Clasificación Pastizal

En la Figura 5-26, se observa una mala relación entre la concentración de sales y la CE, con base en  $R^2$  con valor de 0.3551, esto debido a que la corriente eléctrica se transporta por medio de iones en solución, la conductividad aumenta cuando aumenta la concentración de iones, de tal manera que la conductividad en el agua disuelve compuestos iónicos. En la muestra tres (Los Humeros Geotérmica, Lavaderos, Chignautla) y cuatro (Los Humeros Geotérmica, Pila de desagüe Chignautla), no se encontró relación significativa debido a estudios encontrados donde indican la presencia de Silicio. Hem 1985, encontró en geotermas, la presencia de sílice en forma de  $\text{SiO}_4\text{H}_4$ , en parte disuelta y en parte coloidal, y solo una pequeña parte esta ionizada. Para ésta clasificación la relación es buena.

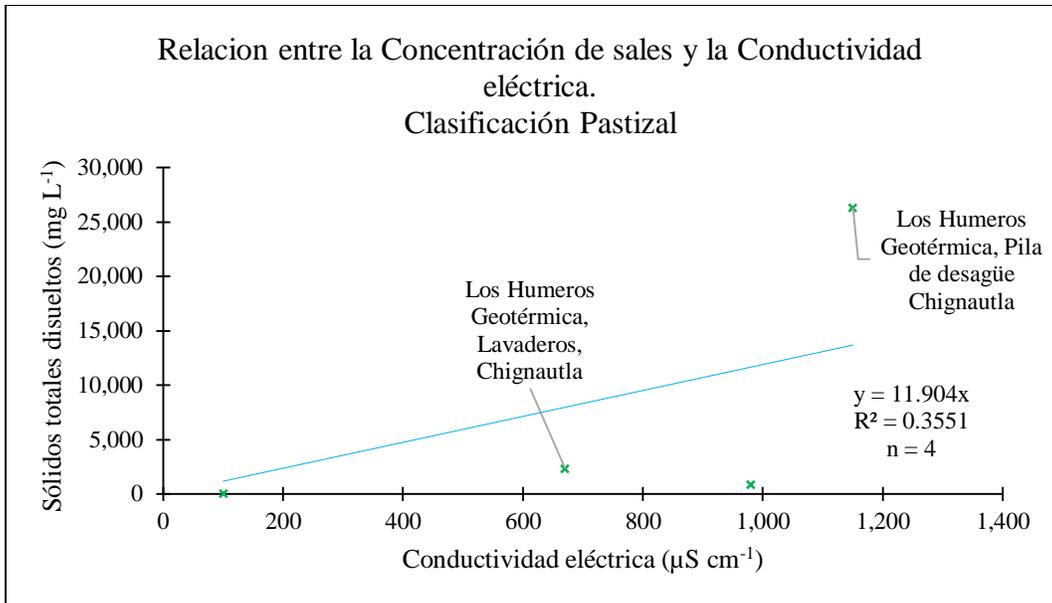


Figura 5-26. Relación entre la concentración de sales y la CE. Clasificación Pastizal.

#### 5.4.6 Clasificación Urbano

En la Figura 5-27, se observa una excelente relación entre la concentración de sales y la CE, con base en  $R^2$  con valor de 0.9143, misma que es muy próxima a tener el valor a 1, dicho valor nos indica una correcta determinación de la concentración de sales.

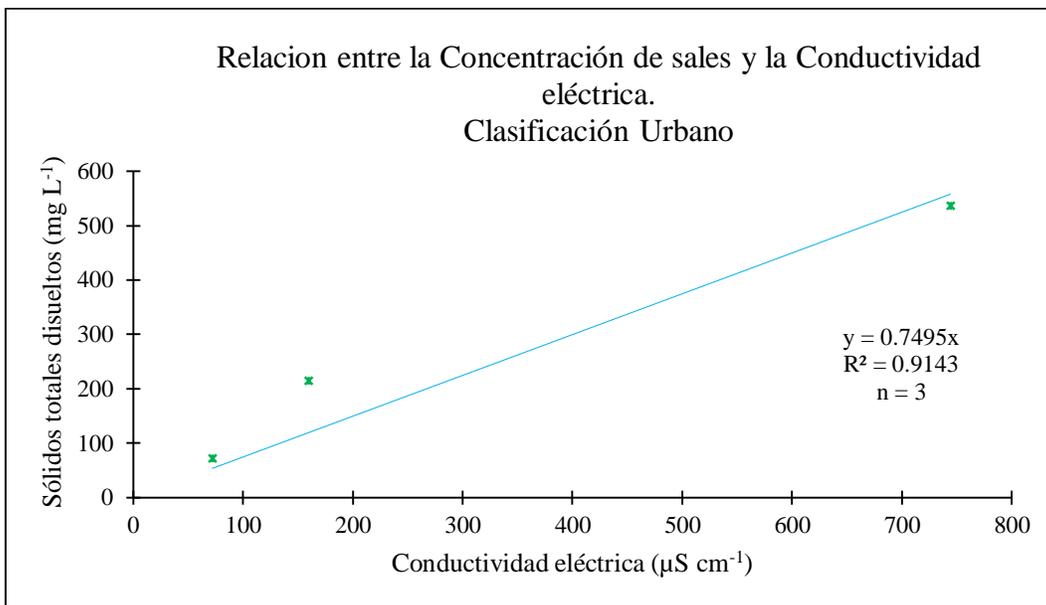


Figura 5-27. Relación entre la concentración de sales y la CE. Clasificación Urbano.

### 5.4.7 Clasificación Vegetación secundaria

En la Figura 5-28, se observa una excelente relación entre la concentración de sales y la CE, con base en  $R^2$  con valor de 0.9324, misma que es muy próxima a tener el valor a 1, dicho valor nos indica una correcta determinación de la concentración de sales.

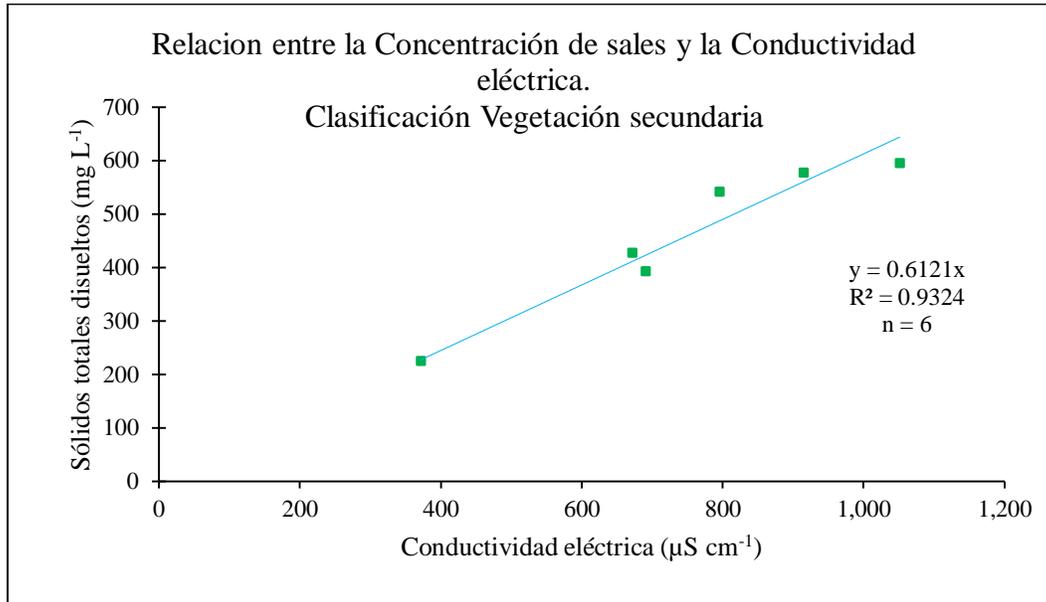


Figura 5-28. Relación entre la concentración de sales y la CE. Clasificación Vegetación secundaria.

## 5.5 Distribución de cationes y aniones

La concentración y distribución de los diferentes iones (Cationes y aniones) de las muestras de agua recolectadas en diferentes puntos de la región centro-sureste de México se presentan a continuación con base en su clasificación.

### 5.5.1 Clasificación Agrícola

La concentración y distribución de iones para este uso de suelo y vegetación se observa en la Figura 5-29, donde el área bajo la curva muestra la concentración de cada ion, se encontró la concentración mayor para una muestra en sodio ( $\text{Na}^+$ ) con  $24.7 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1}$ , seguido de  $\text{HCO}_3^-$  con  $10.90 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1}$ , ambos presentes en la muestra número 25 (Laguna de Totolcingo, en San Salvador el Seco). Por su parte Santoyo (2016), encontró para la Laguna de Totolcingo  $211.61 \text{ mEq L}^{-1}$  de  $\text{Na}^+$ , una cantidad muy por encima de la encontrada en esta investigación. Lo atribuye a las descargas de aguas residuales.

Para esta clasificación el ion con mayor concentración es  $\text{Mg}^{2+}$  y el de menor concentración fue para potasio ( $\text{K}^+$ ).

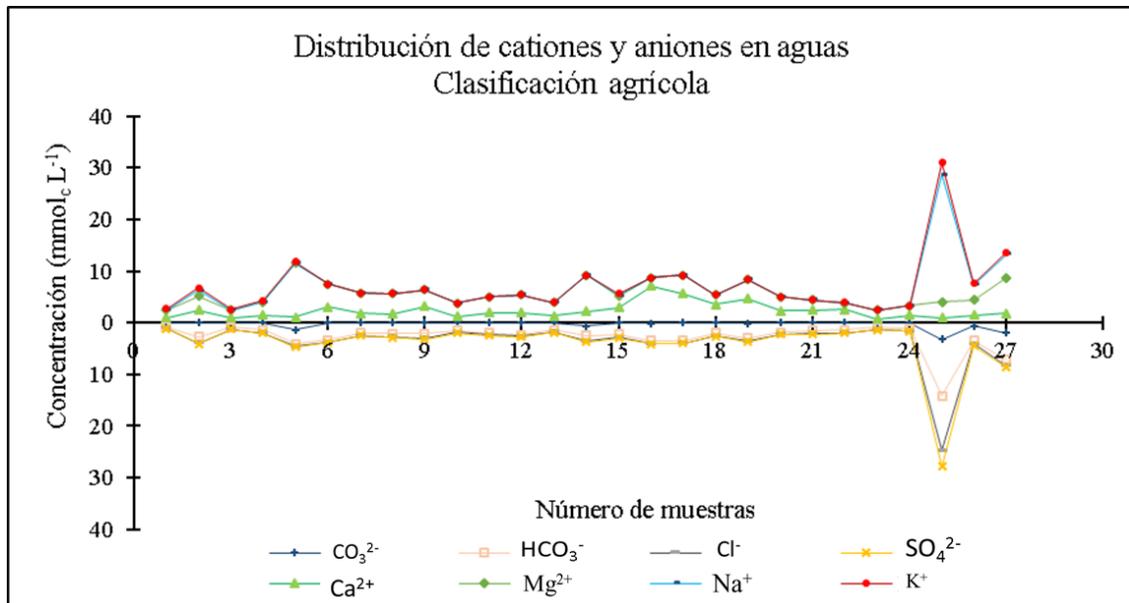


Figura 5-29. Distribución de iones en agua, clasificación agrícola

### 5.5.2 Clasificación Bosque

La concentración y distribución de iones para este uso de suelo y vegetación se observa en la Figura 5-30, donde el área bajo la curva muestra la concentración de cada ion, se encontró la concentración mayor de sales en la muestra número uno (Laguna de Nogales, en Nogales Veracruz), para esta clasificación el ion con mayor concentración es  $\text{Ca}^{2+}$ , seguido de  $\text{Mg}^{2+}$  y el de menor concentración fue para potasio ( $\text{K}^+$ ). Es necesario mencionar que, para esta clasificación, no se encontraron los iones sodio y carbonato.

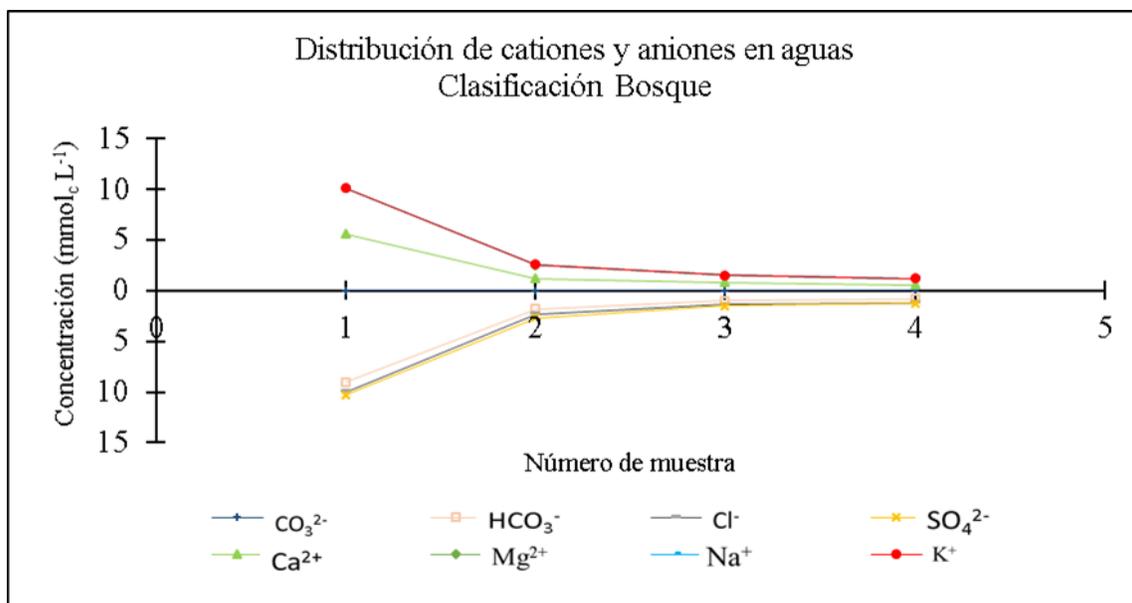


Figura 5-30. Distribución de iones en agua, clasificación bosque.

### 5.5.3 Clasificación Lagos Cráter

La concentración y distribución de iones para este uso de suelo y vegetación se observa en la Figura 5-31, donde el área bajo la curva muestra la concentración de cada ion, se encontró la concentración mayor de sales en la muestra número uno (Alchichica, San José Alchichica) y muestra número cuatro (Atexcac, San Luis Atexcac ), la menor concentración de sales es para la muestra número tres (Quechulac, San Isidro Xaltepec), para esta clasificación el ion con mayor concentración es  $\text{Na}^+$ , seguido de  $\text{Cl}^-$  y el de menor concentración fue para calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ).

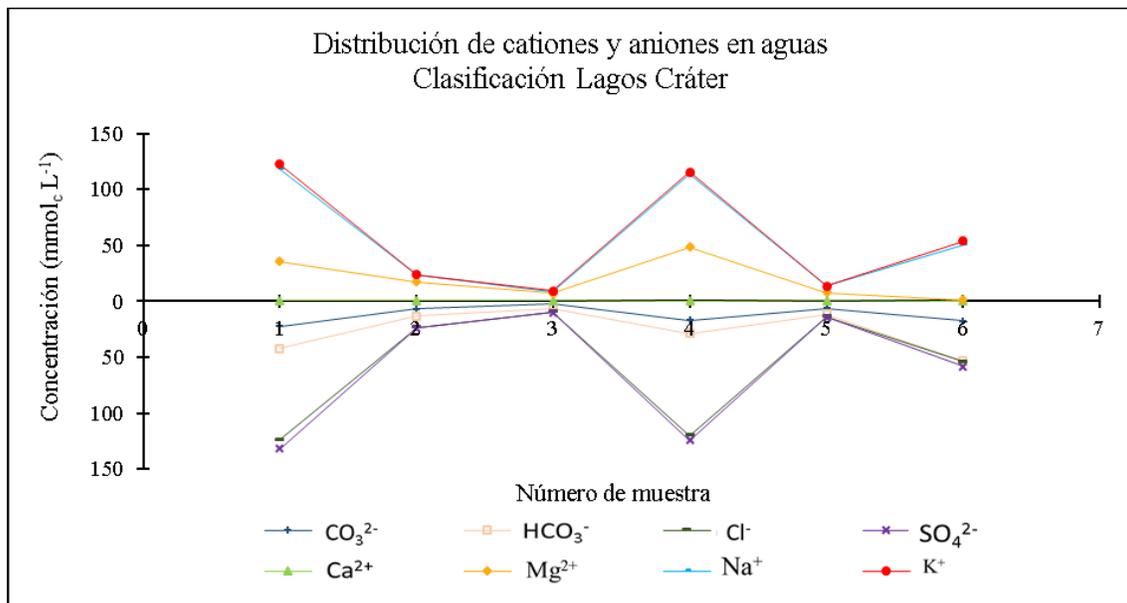


Figura 5-31. Distribución de iones en agua, clasificación Lagos Cráter

### 5.5.4 Clasificación Las Salinas

La concentración y distribución de iones para este uso de suelo y vegetación se observa en la Figura 5-32, donde el área bajo la curva muestra la concentración de cada ion, se encontró la concentración mayor de sales en la muestra número diez (Pileta etapa Final, Las Salinas Chica, Zapotitlán), la menor concentración de sales es para la muestra número 47 (Río Salado en Las Salinas, Zapotitlán), para esta clasificación el ion con mayor concentración es  $\text{Na}^+$ , seguido de  $\text{Cl}^-$  y el de menor concentración fue para calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ).

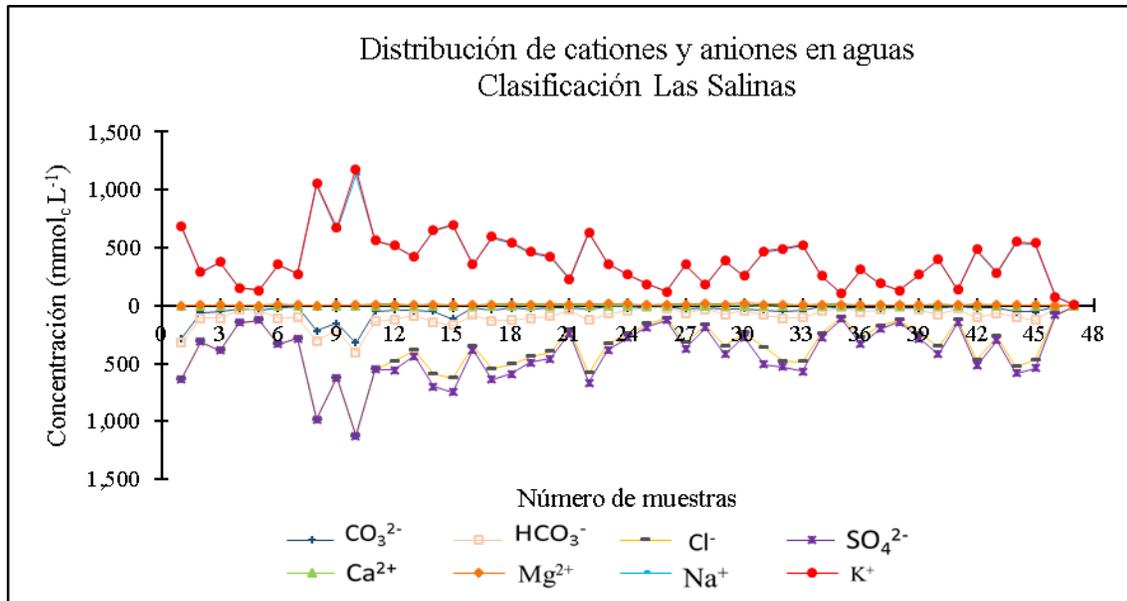


Figura 5-32. Distribución de iones en agua, clasificación Las Salinas

### 5.5.5 Clasificación Pastizal

La concentración y distribución de iones para este uso de suelo y vegetación se observa en la Figura 5-33, donde el área bajo la curva muestra la concentración de cada ion, se encontró la concentración mayor de sales en la muestra número cuatro (Los Humeros Geotérmica, Pila de desagüe Chignautla), la menor concentración de sales es para la muestra número dos (Río Ixhuacán, Ixhuacán de los Reyes), para esta clasificación el ion con mayor concentración es bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) y el de menor concentración fue para carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ).

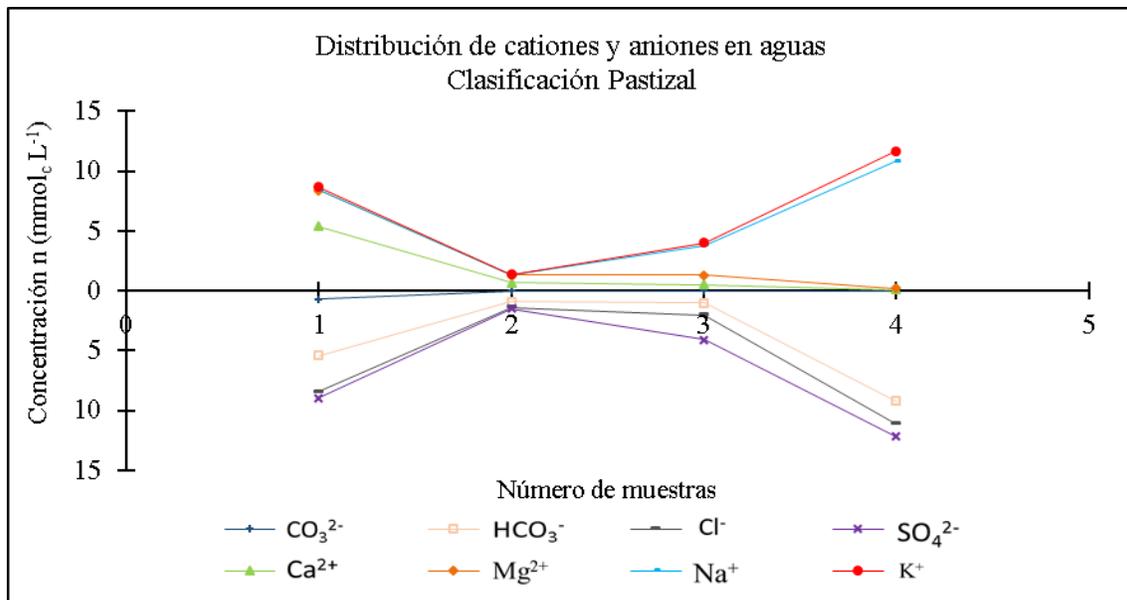


Figura 5-33. Distribución de iones en agua, clasificación Pastizal

### 5.5.6 Clasificación Urbano

La concentración y distribución de iones para este uso de suelo y vegetación se observa en la Figura 5-34, donde el área bajo la curva muestra la concentración de cada ion, se encontró la concentración mayor de sales en la muestra número dos (Río Atoyac, Ciudad de Puebla), la menor concentración de sales es para la muestra número tres (Río Xico, Xicotepac), para esta clasificación el ion con mayor concentración es calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), seguido del ion bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) y el de menor concentración fue para potasio ( $\text{K}^+$ ).

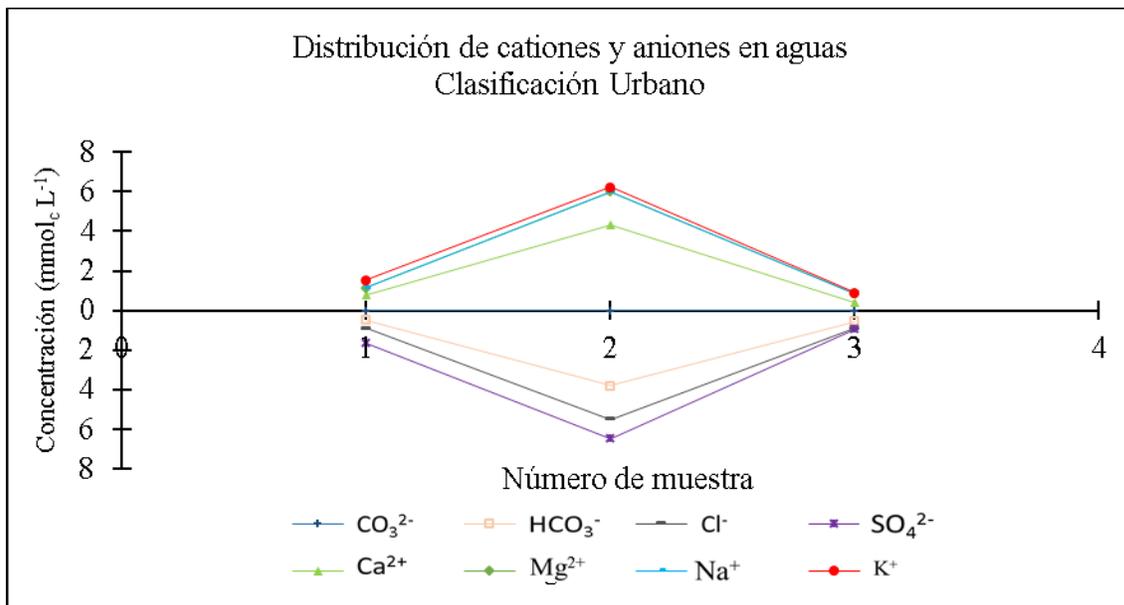


Figura 5-34. Distribución de iones en agua, clasificación Pastizal

### 5.5.7 Clasificación Vegetación Secundaria

La concentración y distribución de iones para este uso de suelo y vegetación se observa en la Figura 5-35, donde el área bajo la curva muestra la concentración de cada ion, se encontró la concentración mayor de sales en la muestra número dos (Nacimiento, entrada Puente de Dios, Molcaxac), la menor concentración de sales es para la muestra número seis (Nacimiento, ojo de agua, Orizaba), para esta clasificación el ion con mayor concentración es bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), seguido del ion magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) y el de menor concentración fue para sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

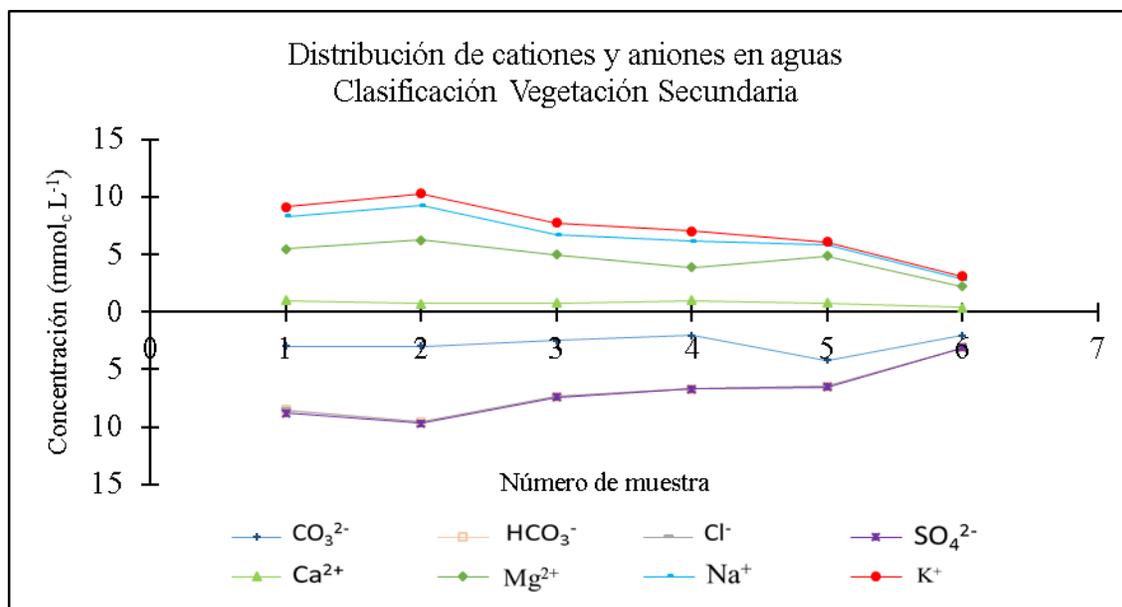


Figura 5-35. Distribución de iones en agua, clasificación Vegetación Secundaria

## 5.6 Relaciones iónicas de las aguas

Las aguas muestreadas presentan en solución diferentes especies de iones, y por tanto tienen diferentes relaciones tanto de cationes como de aniones. Estas aguas en condiciones de equilibrio con los suelos debido a su diferente quimismo, desarrollan distintos procesos físico-químicos en los suelos (Ayers y Westcot, 1987).

Para esta investigación, se obtuvieron muestras de aguas superficiales y subterráneas destinadas al uso agrícola principalmente, que con base en las diferentes concentraciones aniónicas desarrollarán distintos tipos de salinización en los suelos.

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

- |                           |                          |             |
|---------------------------|--------------------------|-------------|
| 1. Clorhídricas           | $Cl^-/SO_4^{2-}$         | $> 2.0$     |
| 2. Sulfático-clorhídricas | $Cl^-/SO_4^{2-}$         | $= 1.0-2.0$ |
| 3. Clorhídrico-sulfáticas | $Cl^-/SO_4^{2-}$         | $= 0.2-1.0$ |
| 4. Sulfáticas             | $Cl^-/SO_4^{2-}$         | $< 0.2$     |
| 5. Sulfático-sódicas      | $HCO_3^-/Cl^-+SO_4^{2-}$ | $= 2.0$     |

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 fluyen y/o se concentran en la región centro-sureste de México, son de concentraciones iónicas

bajas. Can (2005), encontró coincidencias en las zonas de los valles del río Tulancingo Hidalgo, concentraciones iónicas bajas y con predominios de bicarbonatos (anión) y calcio seguido del magnesio (cationes) predominantes.

Las muestras de aguas se analizaron para obtener la relación con diferentes tipos de quimismos, con base en las características de las aguas que desarrollan diferentes tipos de salinización, se clasificaron con base en el uso de suelo y vegetación (ver Cuadro 5-8), se observó que la sal que predomina en el presente estudio es la de tipo clorhídrica, la cual se caracteriza por ser muy soluble en contacto con los cationes, por el contrario, la salinización sulfáticas fue la que menor se presentó, solo se encontró en el lago cráter Tecuitlapa, en San Miguel Tecuitlapa Puebla.

Cuadro 5-8. Clasificación de muestras por tipo de salinización.

<b>Clasificación</b> <b>Salinización</b>	<b>Agrícola</b>	<b>Bosque</b>	<b>Lagos Cráter</b>	<b>Las Salinas</b>	<b>Pastizal</b>	<b>Urbano</b>	<b>Vegetación secundaria</b>
<b>Clorhídrica</b>	22	3	5	46	2	1	-
<b>Clorhídrico-sulfáticas</b>	1	-	-	-	1	1	-
<b>Sulfáticas-sódicas</b>	1	-	-	-	-	-	-
<b>Sulfático-Clorhídrica</b>	3	1	-	1	1	1	-
<b>Sulfáticas</b>	-	-	1	-	-	-	-
<b>Sin salinización</b>	-	-	-	-	-	-	6
<b>Total</b>	27	4	6	47	4	3	6

### 5.7 Índice de salinidad efectiva

La salinidad efectiva es una forma más puntual del peligro que representan las sales solubles del agua de riego, ya que al ser aplicadas forman parte de la solución del suelo (Donnen, 1975), considerando la precipitación de las sales menos solubles, como es 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 muestreadas dentro de la región centro-sureste de México de la presente investigación.

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 conoce mejor los peligros de las sales que se encuentran en solución (Juárez 2015).

El índice de la salinidad efectiva se realizó con base en las clasificaciones antes mencionadas, el resultado se presenta a continuación.

### 5.7.1 Clasificación Agrícola

En el Cuadro 5-9, se observa el tipo de clasificación de las muestras de agua, con un 88.8% del total considerada como buena clasificación. La muestra número 25 (Laguna de Totolcingo, San Salvador el Seco) es la única considerada no recomendable para uso agrícola con base en su alto índice de salinidad efectiva.

Cuadro 5-9. Clasificación de las aguas con base en su salinidad efectiva. Clasificación agrícola

Número de muestra	Índice de Salinidad Efectiva	Clasificación	Número de muestra	Índice de Salinidad Efectiva	Clasificación
1	0.73	Buena	15	0.79	Buena
2	1.51	Buena	16	0.35	Buena
3	0.38	Buena	17	0.80	Buena
4	0.84	Buena	18	0.74	Buena
5	0.89	Buena	19	0.71	Buena
6	0.45	Buena	20	0.32	Buena
7	0.50	Buena	21	0.73	Buena
8	0.72	Buena	22	0.63	Buena
9	1.14	Buena	23	0.41	Buena
10	0.40	Buena	24	0.56	Buena
11	0.55	Buena	25	27.04	No recomendable
12	0.40	Buena	26	3.25	Condicionada
13	0.45	Buena	27	4.93	Condicionada
14	1.10	Buena			

### 5.7.2 Clasificación Bosque

En el Cuadro 5-10, se observa el tipo de clasificación de las muestras de agua, con un 100% del total considerada como buena clasificación. Siendo muy recomendables para uso agrícola con base en su bajo índice de salinidad efectiva.

Cuadro 5-10. Clasificación de las aguas con base en su salinidad efectiva. Clasificación bosque

Número de muestra	Índice de Salinidad Efectiva	Clasificación
1	1.11	Buena
2	0.77	Buena
3	0.52	Buena
4	0.43	Buena

### 5.7.3 Lagos Cráter

En el Cuadro 5-11, se observa el tipo de clasificación de las muestras de agua, con un 16.6% del total considerada como buena clasificación, correspondiente a la muestra tres (Quechulac, San Isidro Xaltepec), siendo la única recomendable para uso agrícola con base en su bajo índice de salinidad efectiva.

Cuadro 5-11. Clasificación de las aguas con base en su salinidad efectiva. Clasificación Lagos Cráter

Número de muestra	Índice de Salinidad Efectiva	Clasificación
1	86.84	No recomendable
2	10.87	Condicionada
3	2.72	Buena
4	86.80	No recomendable
5	6.37	Condicionada
6	52.20	No recomendable

### 5.7.4 Clasificación Las Salinas

En el Cuadro 5-12, se observa el tipo de clasificación de las muestras de agua que al ser salinas no son recomendadas para uso agrícola, del total de las muestras el 2.1 % se considerada como buena clasificación, correspondiente a la muestra 47 (Río Salado en Las Salinas, Zapotitlán), siendo la única recomendable para uso agrícola con base en su bajo índice de salinidad efectiva.

Cuadro 5-12. Clasificación de las aguas con base en su salinidad efectiva. Clasificación Las Salinas

Número de muestra	Índice de Salinidad Efectiva	Clasificación	Número de muestra	Índice de Salinidad Efectiva	Clasificación
1	682.60	No recomendable	25	180.65	No recomendable
2	285.40	No recomendable	26	106.44	No recomendable
3	370.20	No recomendable	27	340.00	No recomendable
4	151.75	No recomendable	28	162.50	No recomendable
5	131.25	No recomendable	29	378.10	No recomendable
6	343.80	No recomendable	30	233.00	No recomendable
7	264.70	No recomendable	31	460.40	No recomendable
8	1055.60	No recomendable	32	479.20	No recomendable
9	665.40	No recomendable	33	516.20	No recomendable
10	1174.0	No recomendable	34	241.50	No recomendable
11	554.10	No recomendable	35	95.51	No recomendable
12	509.20	No recomendable	36	302.70	No recomendable
13	414.00	No recomendable	37	187.30	No recomendable
14	643.10	No recomendable	38	127.10	No recomendable
15	694.00	No recomendable	39	261.00	No recomendable
16	349.30	No recomendable	40	392.00	No recomendable
17	584.10	No recomendable	41	131.70	No recomendable
18	538.70	No recomendable	42	476.40	No recomendable
19	452.80	No recomendable	43	278.10	No recomendable

Número de muestra	Índice de Salinidad Efectiva	Clasificación	Número de muestra	Índice de Salinidad Efectiva	Clasificación
20	413.20	No recomendable	44	542.00	No recomendable
21	214.70	No recomendable	45	531.10	No recomendable
22	618.50	No recomendable	46	74.84	No recomendable
23	346.00	No recomendable	47	2.81	Buena
24	252.00	No recomendable			

### 5.7.5 Clasificación Pastizal

En el Cuadro 5-13, se observa el tipo de clasificación de las muestras de agua, con un 25% del total considerada como buena clasificación, correspondiente a la muestra dos (Río Ixhuacán, Ixhuacán de los Reyes), siendo la única recomendable para uso agrícola con base en su bajo índice de salinidad efectiva, el resto de las muestras son clasificadas como condicionadas.

Cuadro 5-13. Clasificación de las aguas con base en su salinidad efectiva. Clasificación Pastizal

Número de muestra	Índice de Salinidad Efectiva	Clasificación
1	3.26	Condicionada
2	0.46	Buena
3	3.00	Condicionada
4	11.48	Condicionada

### 5.7.6 Clasificación Urbano

En el Cuadro 5-14, se observa el tipo de clasificación de las muestras de agua, con un 100% del total considerada como buena clasificación. Siendo muy recomendables para uso agrícola con base en su bajo índice de salinidad efectiva.

Cuadro 5-14. Clasificación de las aguas con base en su salinidad efectiva. Clasificación Urbano

Número de muestra	Índice de Salinidad Efectiva	Clasificación
1	0.73	Buena
2	1.92	Buena
3	0.36	Buena

### 5.7.7 Clasificación Vegetación Secundaria

En el Cuadro 5-15, se observa el tipo de clasificación de las muestras de agua, con un 50% del total considerada como buena clasificación. Siendo muy recomendables para uso agrícola con base en su bajo índice de salinidad efectiva.

Cuadro 5-15. Clasificación de las aguas con base en su salinidad efectiva. Clasificación Vegetación secundaria

Número de muestra	Índice de Salinidad Efectiva	Clasificación
1	3.63	Condicionada
2	4.05	Condicionada
3	2.73	Buena
4	3.16	Condicionada
5	1.19	Buena
6	0.90	Buena

## 5.8 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 de 50%, es por eso que se debe estimar su efecto sobre la presión osmótica (Ramírez, 2009).

Las aguas muestreadas, fueron clasificadas con base en el uso de suelo y vegetación y en general no se encontraron restricciones, solo para el caso de las salinas por su alto contenido de cloro. A continuación, se muestra los resultados de las muestras.

### 5.8.1 Clasificación Agrícola

En el Cuadro 5-16, se observa el tipo de clasificación de las muestras de agua para el índice de salinidad potencial, misma que obtuvo un 96.3% del total considerada como buena clasificación. Siendo muy recomendables para uso agrícola con base en su bajo índice de salinidad potencial.

Cuadro 5-16. Clasificación de las aguas con base en su salinidad potencial. Clasificación Agrícola

Número de muestra	Índice de Salinidad Potencial	Clasificación	Número de muestra	Índice de Salinidad Potencial	Clasificación
1	0.47	Buena	15	0.74	Buena
2	1.39	Buena	16	0.63	Buena
3	0.35	Buena	17	0.53	Buena
4	0.70	Buena	18	0.65	Buena
5	0.61	Buena	19	0.67	Buena
6	0.54	Buena	20	0.44	Buena
7	0.50	Buena	21	0.70	Buena
8	0.69	Buena	22	0.66	Buena
9	1.06	Buena	23	0.48	Buena
10	0.43	Buena	24	0.53	Buena
11	0.49	Buena	25	13.74	Condicionada
12	0.42	Buena	26	1.03	Buena
13	0.44	Buena	27	1.53	Buena
14	1.13	Buena			

### 5.8.2 Clasificación Bosque

En el Cuadro 5-17, se observa el tipo de clasificación de las muestras de agua para el índice de salinidad potencial, misma que obtuvo un 100% del total considerada como buena clasificación. Siendo muy recomendables para uso agrícola con base en su bajo índice de salinidad potencial.

Cuadro 5-17. Clasificación de las aguas con base en su salinidad potencial. Clasificación Bosque

Número de muestra	Índice de Salinidad Potencial	Clasificación
1	1.10	Buena
2	0.69	Buena
3	0.44	Buena
4	0.40	Buena

### 5.8.3 Clasificación Lagos Cráter

En el Cuadro 5-18, se observa el tipo de clasificación de las muestras de agua para el índice de salinidad potencial, misma que obtuvo un 50% del total considerada como buena clasificación. Siendo muy recomendables para uso agrícola con base en su bajo índice de salinidad potencial, el resto de las muestras no son recomendables para uso agrícola.

Cuadro 5-18. Clasificación de las aguas con base en su salinidad potencial. Clasificación Lagos Cráter

Número de muestra	Índice de Salinidad Potencial	Clasificación
1	85.64	No recomendada
2	10.65	Condicionada
3	3.13	Buena
4	93.03	No recomendada
5	2.38	Buena
6	2.84	Buena

### 5.8.4 Clasificación Las Salinas

En el Cuadro 5-19, se observa el tipo de clasificación de las muestras de agua para el índice de salinidad potencial, misma que obtuvo un 97.9% del total considerada como mala clasificación. Siendo no recomendables para uso agrícola con base en su alto índice de salinidad potencial, solo la muestra 47 (Río Salado en Las Salinas, Zapotitlán) es recomendables para uso agrícola.

Cuadro 5-19. Clasificación de las aguas con base en su salinidad potencial. Clasificación Las Salinas

Número de muestra	Índice de Salinidad Potencial	Clasificación	Número de muestra	Índice de Salinidad Potencial	Clasificación
1	310.18	No recomendable	25	155.72	No recomendable
2	199.52	No recomendable	26	97.95	No recomendable

Número de muestra	Índice de Salinidad Potencial	Clasificación	Número de muestra	Índice de Salinidad Potencial	Clasificación
3	274.01	No recomendable	27	275.60	No recomendable
4	108.05	No recomendable	28	145.41	No recomendable
5	83.11	No recomendable	29	308.53	No recomendable
6	224.42	No recomendable	30	210.97	No recomendable
7	182.86	No recomendable	31	354.97	No recomendable
8	680.63	No recomendable	32	398.34	No recomendable
9	406.90	No recomendable	33	423.45	No recomendable
10	722.14	No recomendable	34	209.34	No recomendable
11	415.12	No recomendable	35	88.65	No recomendable
12	402.84	No recomendable	36	251.89	No recomendable
13	324.90	No recomendable	37	146.60	No recomendable
14	503.40	No recomendable	38	117.06	No recomendable
15	517.73	No recomendable	39	221.60	No recomendable
16	283.16	No recomendable	40	314.82	No recomendable
17	462.93	No recomendable	41	109.83	No recomendable
18	421.32	No recomendable	42	390.67	No recomendable
19	355.34	No recomendable	43	216.76	No recomendable
20	337.34	No recomendable	44	456.94	No recomendable
21	185.83	No recomendable	45	381.97	No recomendable
22	498.78	No recomendable	46	62.49	No recomendable
23	284.27	No recomendable	47	2.01	Buena
24	217.27	No recomendable			

### 5.8.5 Clasificación Pastizal

En el Cuadro 5-20, se observa el tipo de clasificación de las muestras de agua para el índice de salinidad potencial, misma que obtuvo un 100% del total considerada como buena clasificación. Siendo muy recomendables para uso agrícola con base en su bajo índice de salinidad potencial.

Cuadro 5-20. Clasificación de las aguas con base en su salinidad potencial. Clasificación Pastizal

Número de muestra	Índice de Salinidad Potencial	Clasificación
1	3.27	Buena
2	0.53	Buena
3	2.04	Buena
4	2.44	Buena

### 5.8.6 Clasificación Urbano

En el Cuadro 5-21, se observa el tipo de clasificación de las muestras de agua para el índice de salinidad potencial, misma que obtuvo un 100% del total considerada como buena clasificación. Siendo muy recomendables para uso agrícola con base en su bajo índice de salinidad potencial.

Cuadro 5-21. Clasificación de las aguas con base en su salinidad potencial. Clasificación Urbano

Número de muestra	Índice de Salinidad Potencial	Clasificación
1	0.77	Buena
2	2.18	Buena
3	0.38	Buena

### 5.8.7 Clasificación Vegetación Secundaria

En el Cuadro 5-22, se observa el tipo de clasificación de las muestras de agua para el índice de salinidad potencial, misma que obtuvo un 100% del total considerada como buena clasificación. Son muy recomendables para uso agrícola con base en su índice

Cuadro 5-22. Clasificación de las aguas con base en su salinidad potencial. Clasificación Vegetación secundaria

Número de muestra	Índice de Salinidad Potencial	Clasificación
1	0.15	Buena
2	0.04	Buena
3	0.03	Buena
4	0.00	Buena
5	0.01	Buena
6	0.01	Buena

## 5.9 Síntesis de clasificación de las aguas con base en su relación de adsorción de sodio (RAS) en sus tres conceptualizaciones

La sodicidad se refiere a la prevalencia en las soluciones de los iones de sodio ( $\text{Na}^+$ ) sobre los iones divalentes ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ), y aquí la sodicidad debe entenderse a los iones de sodio sin su componente osmótico, ya que el componente osmótico está relacionado con la salinidad (Can, 2011).

La sodicidad se estima con el criterio de relación de adsorción de sodio (RAS). Es por ello que los niveles de sodificación que adquieren los diferentes suelos que son regados con aguas de distintas relaciones catiónicas dependerán de los valores distintos de RAS.

La clasificación de los tres tipos de RAS para cada una de las muestras fue similar en la mayoría, los resultados fueron obtenidos con relación a la clasificación de muestras con base en el uso de suelo y vegetación para la región centro-sureste de México, se presentan a continuación. No se realizó la clasificación de RAS para las Salinas debido a su alto contenido de sodio, quedando así no aptas para uso agrícola a excepción de la muestra número 47 (Río Salado en Las Salinas, Zapotitlán), la cual es la única apta para uso agrícola.

### 5.9.1 Clasificación Agrícola

En el Cuadro 5-23, se observan los tres tipos de clasificación similares de RAS para cada una de las muestras, del cual 92.6% de las muestras son aptas para el uso agrícola, la muestra número 27 (manantial el Carmen, Tequexquitla), no es conveniente su uso en la agricultura debido a que causa problemas por concentración, pero no por sodicidad y la muestra número 25 (Laguna Totolcingo, San Salvador el Seco), no es propia para riego agrícola bajo condiciones ordinarias y puede provocar niveles altos de sodio intercambiable casi en todos los tipos de suelo, en la Figura 5-36, se observar el diagrama para la clasificación de las aguas para riego, mostrando el riesgo de salinización alto para la muestra número 27 y muy alto para la muestra 25.

Cuadro 5-23. Valores de los tres tipos de RAS por muestra. Clasificación agrícola

Muestra	CE $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	RAS original $\text{mEq L}^{-1}$	Clasificación	RAS ajustado $\text{mEq L}^{-1}$	Clasificación	Ras corregido $\text{mEq L}^{-1}$	Clasificación
1	121.60	0.00	C1S1	0.00	C1S1	0.00	C1S1
2	545.50	0.88	C2S1	1.53	C2S1	0.89	C2S1
3	133.30	0.00	C1S1	0.00	C1S1	0.00	C1S1

Muestra	CE μS/cm <sup>-1</sup>	RAS original mEq L <sup>-1</sup>	Clasificación	RAS ajustado mEq L <sup>-1</sup>	Clasificación	Ras corregido mEq L <sup>-1</sup>	Clasificación
4	254.85	0.00	C1S1	0.00	C1S1	0.00	C1S1
5	596.50	0.00	C2S1	0.00	C2S1	0.00	C2S1
6	367.95	0.00	C2S1	0.00	C2S1	0.00	C2S1
7	295.30	0.00	C2S1	0.00	C2S1	0.00	C2S1
8	296.80	0.00	C2S1	0.00	C2S1	0.00	C2S1
9	339.60	0.00	C2S1	0.00	C2S1	0.00	C2S1
10	196.45	0.00	C1S1	0.00	C1S1	0.00	C1S1
11	229.65	0.00	C1S1	0.00	C1S1	0.00	C1S1
12	276.10	0.00	C2S1	0.00	C2S1	0.00	C2S1
13	204.90	0.00	C1S1	0.00	C1S1	0.00	C1S1
14	459.50	0.00	C2S1	0.00	C2S1	0.00	C2S1
15	274.80	0.09	C2S1	0.15	C2S1	0.09	C2S1
16	364.45	0.00	C2S1	0.00	C2S1	0.00	C2S1
17	327.85	0.00	C2S1	0.00	C2S1	0.00	C2S1
18	231.25	0.00	C1S1	0.00	C1S1	0.00	C1S1
19	367.00	0.00	C2S1	0.00	C2S1	0.00	C2S1
20	234.95	0.00	C1S1	0.00	C1S1	0.00	C1S1
21	161.05	0.00	C1S1	0.00	C1S1	0.00	C1S1
22	191.20	0.00	C1S1	0.00	C1S1	0.00	C1S1
23	97.30	0.00	C1S1	0.00	C1S1	0.00	C1S1
24	102.35	0.00	C1S1	0.00	C1S1	0.00	C1S1
25	2984.0	24.70	C4S3	53.60	C4S4	25.96	C4S3
26	582.50	2.86	C2S1	5.38	C2S1	2.80	C2S1
27	897.50	3.09	C3S1	7.30	C3S1	3.19	C3S1

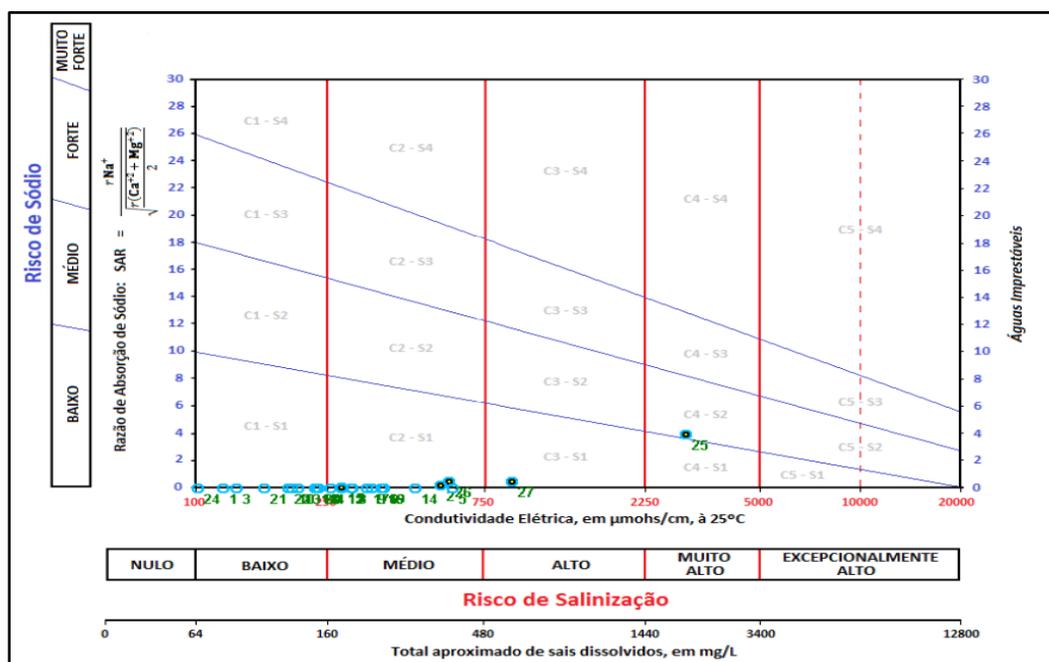


Figura 5-36. Figura 44. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego. Clasificación agrícola

## 5.9.2 Clasificación Bosque

En el Cuadro 5-24, se observan los tres tipos de clasificación similares de RAS para cada una de las muestras, del cual 75% de las muestras son aptas para el uso agrícola, la muestra número uno (Laguna de Nogales, Nogales), no es conveniente su uso en la agricultura debido a que causa problemas por concentración, pero no por sodicidad. En la Figura 5-37, se observar el diagrama para la clasificación de las aguas para riego, mostrando el riesgo de salinización alto para la muestra número uno, la muestra número tres (Puente Río Jamapa) no se representa en el diagrama al tener menos de 100  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  de CE

Cuadro 5-24. Valores de los tres tipos de RAS por muestra. Clasificación bosque

Muestra	CE $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	RAS original $\text{mEq L}^{-1}$	Clasificación	RAS ajustado $\text{mEq L}^{-1}$	Clasificación	Ras corregido $\text{mEq L}^{-1}$	Clasificación
1	121.60	0.00	C3S1	0.00	C3S1	0.00	C3S1
2	545.50	0.00	C1S1	0.00	C1S1	0.00	C1S1
3	133.30	0.00	C1S1	0.00	C1S1	0.00	C1S1
4	254.85	0.00	C1S1	0.00	C1S1	0.00	C1S1

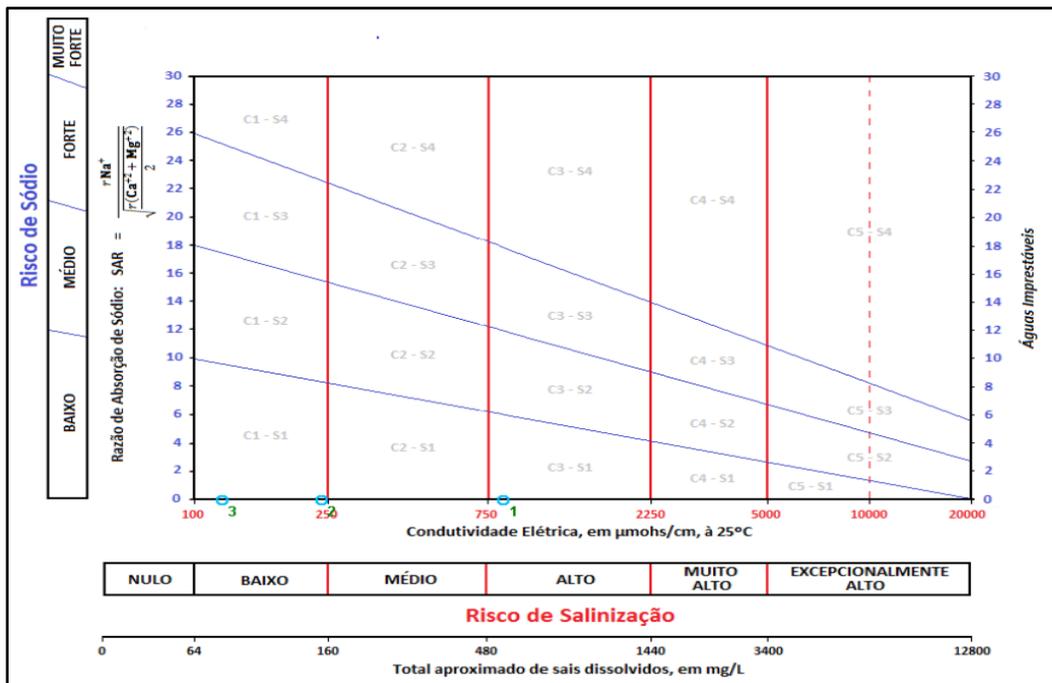


Figura 5-37. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego. Clasificación bosque

### 5.9.3 Clasificación Lagos cráter

En el Cuadro 5-25, se observan los tres tipos de clasificación similares de RAS para cada una de las muestras, de las cuales ninguna de las muestras es apta para el uso agrícola, la muestra número seis (Tecuitlapa, San Miguel Tecuitlapa), es la de mayor riesgo al no ser apropiada para riego por su alta concentración y su alta sodicidad. En la Figura 5-38, se observar el diagrama para la clasificación de las aguas para riego, mostrando el riesgo de salinización extremadamente alto y fuertemente sódica para la muestra número seis (Tecuitlapa, San Miguel Tecuitlapa), para la muestra uno (Alchichica, San José Alchichica) y cuatro (Atexcac, San Luis Atexcac), el riesgo de salinización es extremadamente alto y el riesgo de sodificación es medio.

Cuadro 5-25. Valores de los tres tipos de RAS por muestra. Clasificación Lagos Cráter

Muestra	CE $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	RAS original $\text{mEq L}^{-1}$	Clasificación	RAS Ajustado $\text{mEq L}^{-1}$	Clasificación	RAS corregido $\text{mEq L}^{-1}$	Clasificación
1	121.60	19.54	C4S3	4.59	C4S1	19.65	C4S2
2	545.50	2.15	C3S1	6.57	C3S1	2.13	C3S1
3	133.30	1.01	C3S1	2.51	C3S1	1.03	C3S1
4	254.85	13.35	C4S2	7.87	C4S1	13.35	C4S2
5	596.50	3.02	C3S1	8.16	C3S1	3.07	C3S1
6	367.95	58.02	C4S4	144.46	C4S4	58.63	C4S4

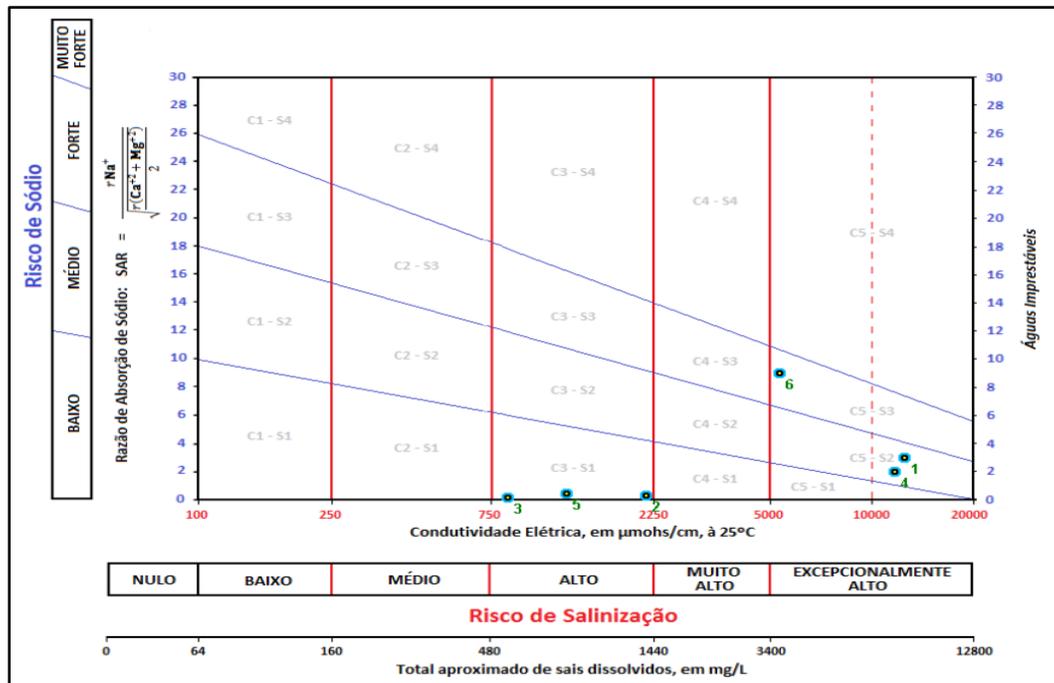


Figura 5-38. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego. Clasificación Lagos Cráter

### 5.9.4 Clasificación Pastizal

En el Cuadro 5-26, se observan los tres tipos de clasificación similares de RAS para cada una de las muestras, del cual 50% de las muestras son aptas para el uso agrícola, la muestra número cuatro (Los Humeros Geotérmica, Pila de desagüe Chignautla), no es conveniente su uso en la agricultura debido a que causa problemas por concentración y sodicidad y puede provocar niveles altos de sodio intercambiable casi en todos los tipos de suelo. En la Figura 5-39, se observar el diagrama para la clasificación de las aguas para riego, mostrando el riesgo de salinización alto y el riesgo medio para sódica en la muestra número cuatro, para la muestra dos (Río Ixhuacán, Ixhuacán de los Reyes), el riesgo de salinización es nulo y el riesgo de sodificación es bajo.

Cuadro 5-26. Valores de los tres tipos de RAS por muestra. Clasificación Pastizal

Muestra	CE $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	RAS original $\text{mEq L}^{-1}$	Clasificación	RAS ajustado $\text{mEq L}^{-1}$	Clasificación	Ras corregido $\text{mEq L}^{-1}$	Clasificación
1	980.00	0.00	C3S1	0.00	C3S1	0.00	C3S1
2	100.00	0.00	C1S1	0.00	C1S1	0.00	C1S1
3	670.00	3.10	C2S1	3.16	C2S1	2.47	C2S1
4	1150.00	33.68	C3S4	39.07	C3S4	28.99	C3S4

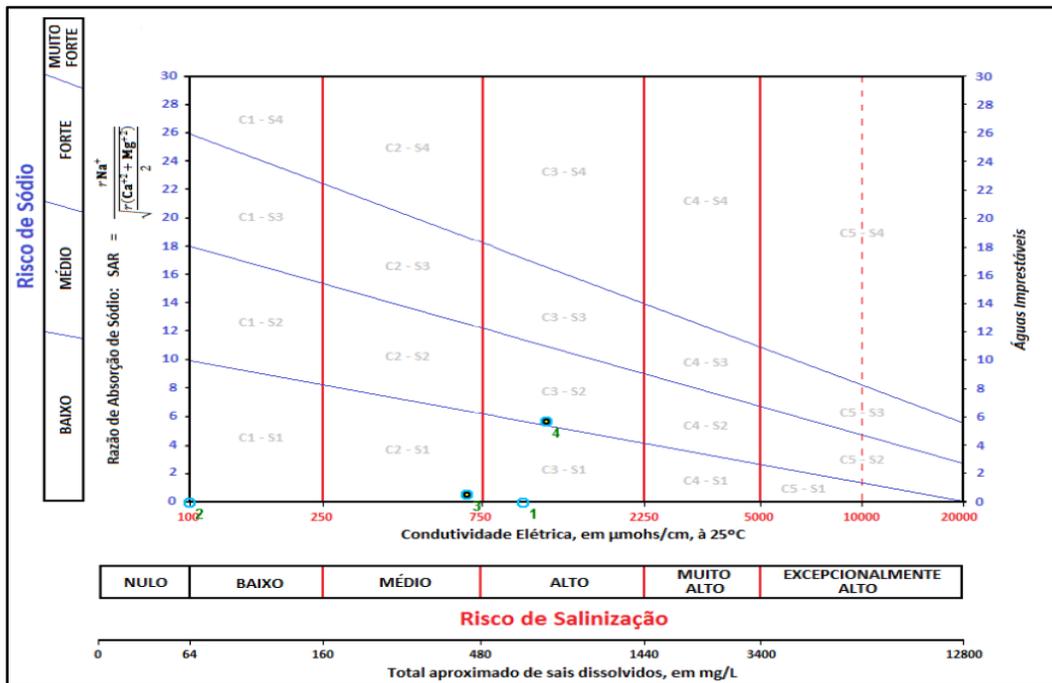


Figura 5-39. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego. Clasificación Pastizal.

### 5.9.5 Clasificación Urbano

En el Cuadro 5-27, se observan los tres tipos de clasificación iguales de RAS para cada una de las muestras, debido a que no existe la presencia del ion sodio, el 100% de las muestras son aptas para la agricultura y no presentan algún problema fuerte con su uso. En la Figura 5-40, se observar el diagrama para la clasificación de las aguas para riego, mostrando el riesgo de salinización medio y el riesgo sódico bajo para la muestra número dos (Río Atoyac, Ciudad de Puebla), para la muestra uno (Comunidad Francisco Villa), el riesgo de salinización es nulo al tener menor de 100  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  de CE y el riesgo de sodificación es bajo.

Cuadro 5-27. Valores de los tres tipos de RAS por muestra. Clasificación Urbano

Muestra	CE $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	RAS original $\text{mEq L}^{-1}$	Clasificación	RAS ajustado $\text{mEq L}^{-1}$	Clasificación	Ras corregido $\text{mEq L}^{-1}$	Clasificación
1	159.80	0.00	C1S1	0.00	C1S1	0.00	C1S1
2	744.50	0.00	C2S1	0.00	C2S1	0.00	C2S1
3	72.00	0.00	C1S1	0.00	C1S1	0.00	C1S1

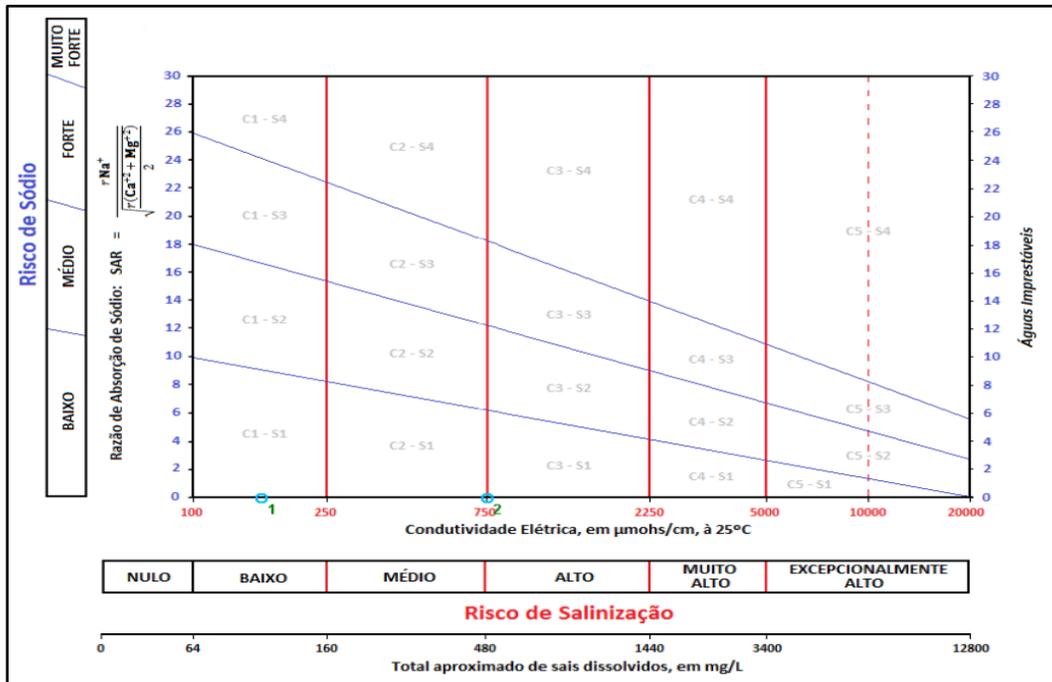


Figura 5-40. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego. Clasificación Urbano

### 5.9.6 Clasificación Vegetación Secundaria

En el Cuadro 5-28, se observan los tres tipos de clasificación similares de RAS para cada una de las muestras, del cual el 50% de las muestras son aptas para el uso agrícola, siempre y cuando tengan un grado moderado de lavado de suelos y el otro 50% de las muestras no es conveniente usarlas para riego en suelos cuyo drenaje sea deficiente, y aun con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales para el control de la salinidad. Ambas clasificaciones no tienen problemas con la sodificación. En la Figura 5-41, se observan el diagrama para la clasificación de las aguas para riego, mostrando el riesgo de salinización alto y el riesgo sódico bajo para el 50% de las muestras no aptas para su uso agrícola, el otro 50% de las muestras tienen restricción en su uso al ser de riesgo de salinización medio y el riesgo sódico bajo.

Cuadro 5-28. Valores de los tres tipos de RAS por muestra. Clasificación Secundaria

Muestra	CE μS/cm <sup>-1</sup>	RAS original mEq L <sup>-1</sup>	Clasificación	RAS ajustado mEq L <sup>-1</sup>	Clasificación	Ras corregido mEq L <sup>-1</sup>	Clasificación
1	915.00	1.69	C3S1	4.22	C3S1	1.74	C3S1
2	1051.50	1.70	C3S1	4.43	C3S1	1.73	C3S1
3	796.00	1.08	C3S1	2.58	C3S1	1.09	C3S1
4	672.50	1.61	C2S1	3.55	C2S1	1.67	C2S1
5	691.50	0.57	C2S1	1.35	C2S1	0.57	C2S1
6	371.90	0.57	C2S1	0.47	C2S1	0.50	C2S1

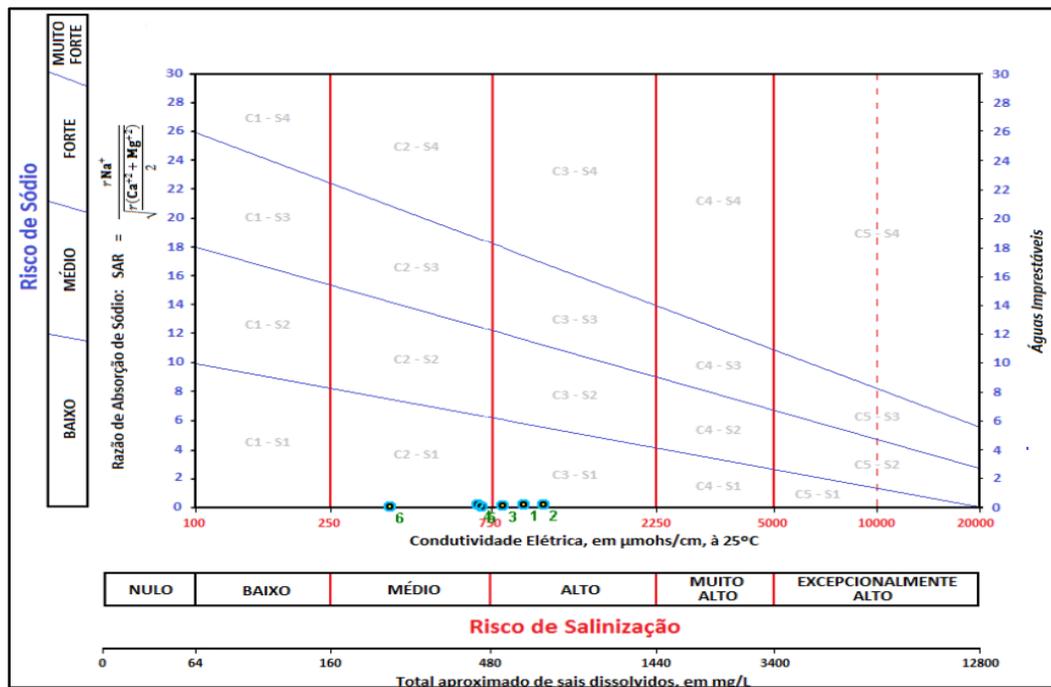


Figura 5-41. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego. Clasificación Vegetación secundaria

## 5.10 Clasificación Hidrogeoquímica de las aguas.

Mediante el diagrama triangular de Piper, se logra representar los siguientes seis componentes:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $(\text{Na}^{+}+\text{K}^{+})$ ,  $(\text{CO}_3^{2-}+\text{HCO}_3^{-})$ ,  $\text{Cl}^{-}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . Cuando se realiza la graficación con base en Piper 1944, se logra representar muchos análisis sin dar motivo a una confusión.

### 5.10.1 Clasificación las Salinas.

En la Figura 5-42, clasificación hidrogeoquímica de las aguas Las Salinas, se observa la homogenización de las muestras al tener el 96% clasificadas como sódicas cloradas, la muestra número uno (Pozo 1, Las Salinas Chica, Zapotitlán) es la única que presenta la clasificación Sódica bicarbonatada debido a la alta concentración de carbonatos de calcio, la muestra número 47 (Río Salado en Las Salinas, Zapotitlán) es la única muestra que se clasifica como magnésica mixta, al ser una agua que se encuentra diluida por otras corrientes de agua. Por su parte Juárez 2015 y Torres 2018, encontraron un 92 y 95% respectivamente en clasificación sódicas-cloradas para diferentes muestras en las Salinas y ambos coinciden con la presente investigación sobre la muestra del Río Salado el cual es de origen magnésica mixta.

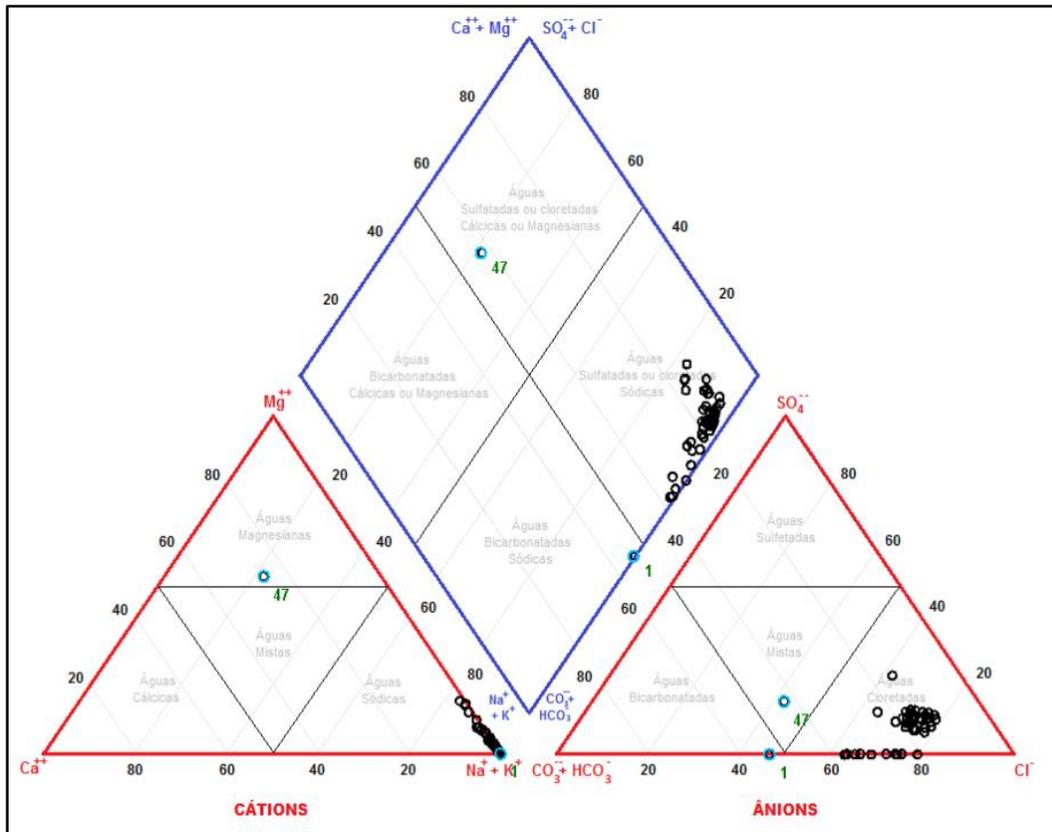


Figura 5-42. clasificación hidrogeoquímica de las aguas Las Salinas

### 5.10.2 Clasificación Lagos cráter

En la Figura 5-43, clasificación hidrogeoquímica de las aguas Lagos Cráter, se observa la distribución de las muestras: muestra número uno (Alchichica, San José Alchichica), clasificada como sulfatada sódica, muestra seis (Tecuitlapa, San Miguel Tecuitlapa), clasificada como bicarbonatada sódica, muestra número cuatro (Atexcac, San Luis Atexcac), como agua sulfatada y/o clorurada, cálcica y/o magnésica, el resto de las muestras pertenece a la clasificación aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas. Por su parte Juárez (2015) y Torres (2018), coinciden con la presente clasificación hidrogeoquímica. Santoyo (2016), encontró que la muestra número dos (La Preciosa) es de origen bicarbonatada-sódica, difiere del resultado encontrado, la cual se clasifica como bicarbonatada-cálcica.

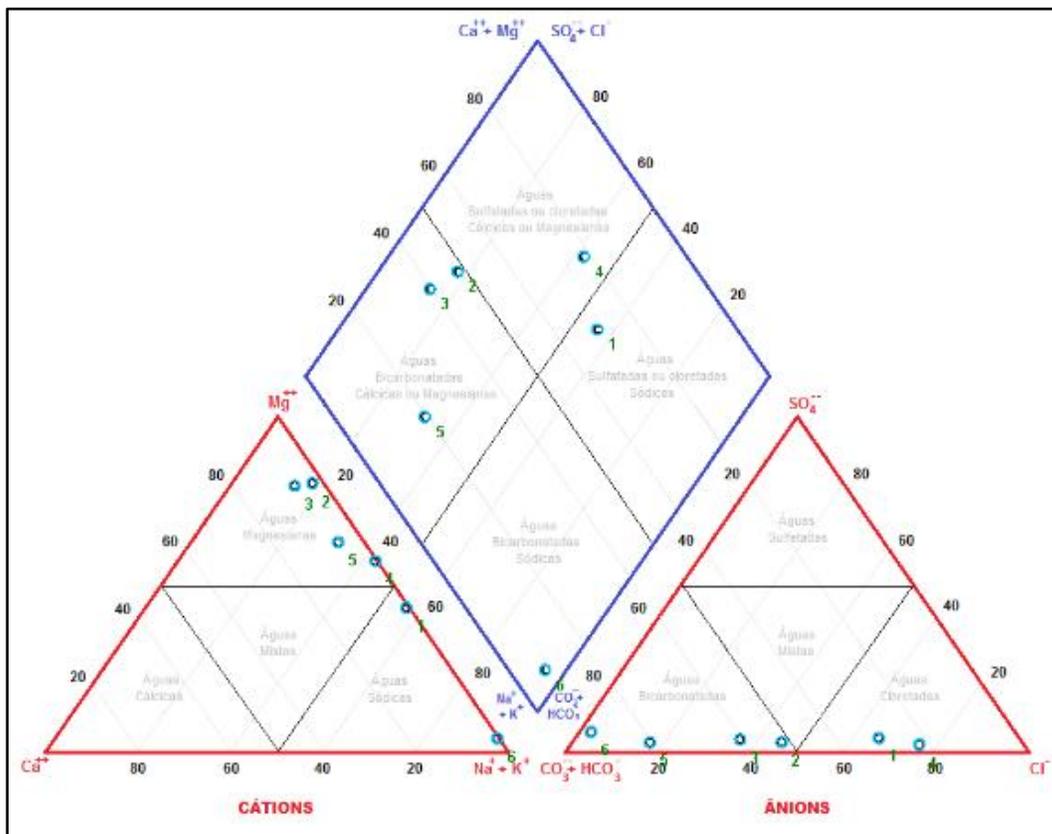


Figura 5-43. Clasificación hidrogeoquímica de las aguas Lagos Cráter

## **5.11 Contenido de boro, fósforo y nitrógeno en las aguas**

### **5.11.1 Contenido de boro**

Los límites de tolerancia de los cultivos agrícolas a las concentraciones de boro son: muy sensibles ( $< 0.5 \text{ mg L}^{-1}$ ), sensibles ( $0.5-1.0 \text{ mg L}^{-1}$ ), moderadamente sensibles ( $1.0-2.0 \text{ mg L}^{-1}$ ), moderadamente tolerantes ( $2.0-40.0 \text{ mg L}^{-1}$ ), tolerantes ( $4.0-6.0 \text{ mg L}^{-1}$ ) y muy tolerantes ( $6.0-15.0 \text{ mg L}^{-1}$ ) (Ayers y Westcot, 1987).

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.

Por lo común las concentraciones tóxicas del boro en los suelos para los cultivos se encuentran en las zonas áridas. 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. Las especies vegetales difieren en su tolerancia al boro (Maas, 1990).

La determinación de boro se realizó en las aguas muestreadas por clasificación con base en el uso de suelo y vegetación para la región centro-sureste de México, a continuación, se describen los resultados.

### 5.11.1.1 Clasificación Agrícola

En la Figura 5-44, se observan las diferentes concentraciones de boro de las cuatro muestras de agua, de las cuales el 70.4% se encuentran menor a  $0.5 \text{ mg L}^{-1}$  de boro, para éste valor el límite de los cultivos agrícolas es muy sensible. El 18.5% de las muestras se encuentra dentro de los valores  $6.0\text{-}15.0 \text{ mg L}^{-1}$ , mismo que nos indica que los cultivos agrícolas son muy tolerantes a esa concentración.

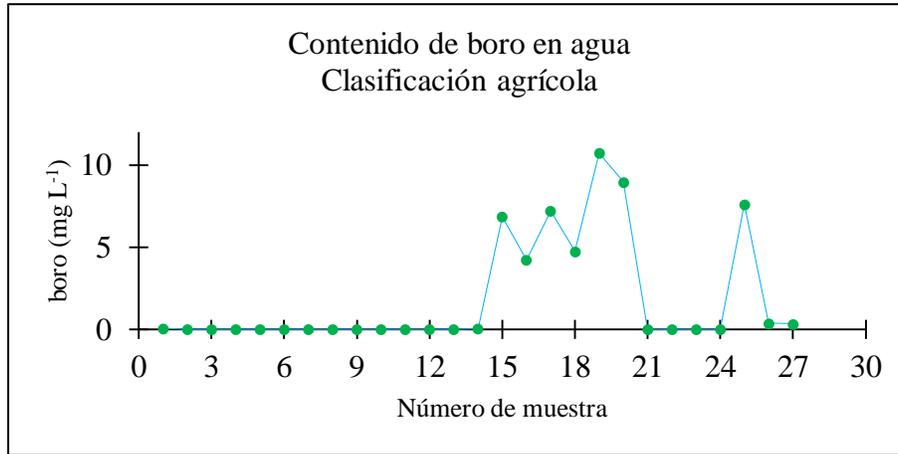


Figura 5-44. Concentración de boro ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación agrícola

### 5.11.1.2 Clasificación Bosque

En la Figura 5-45, se observan las diferentes concentraciones de boro de las cuatro muestras de agua, de las cuales el 50% se encuentra dentro de  $4.0\text{-}6.0 \text{ mg L}^{-1}$  de boro, para éste valor el límite de los cultivos agrícolas es tolerante. El 50% de las muestras se encuentra dentro de los valores  $6.0\text{-}15.0 \text{ mg L}^{-1}$ , mismo que nos indica que los cultivos agrícolas son muy tolerantes a esa concentración.

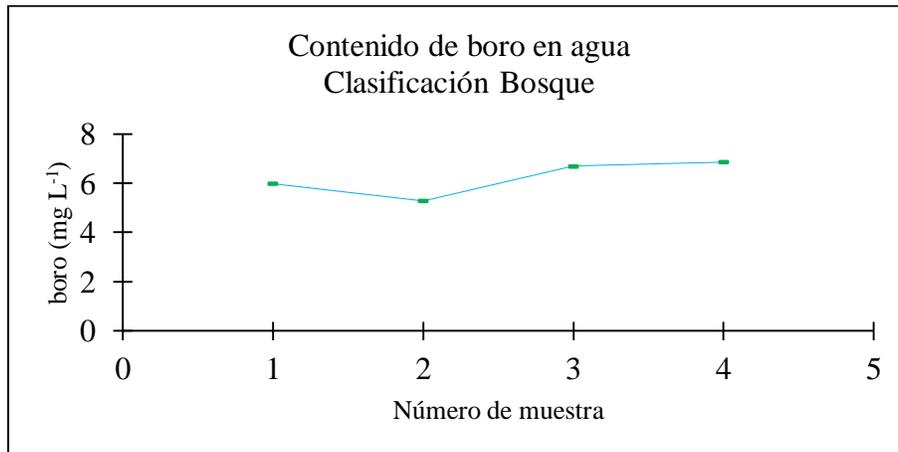


Figura 5-45. Concentración de boro ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación bosque

### 5.11.1.3 Clasificación Lagos Cráter

En la Figura 5-46, se observan las diferentes concentraciones de boro de las seis muestras de agua, de las cuales el 66.7% tienen contenidos permisibles de boro para su uso en la agricultura. La muestra número uno (Alchichica, San José Alchichica) y la muestra número cuatro (Atexcac, San Luis Atexcac) rebasan los límites máximos permisibles de tolerancia de boro para los cultivos agrícolas, por ello no son aptas para su uso.

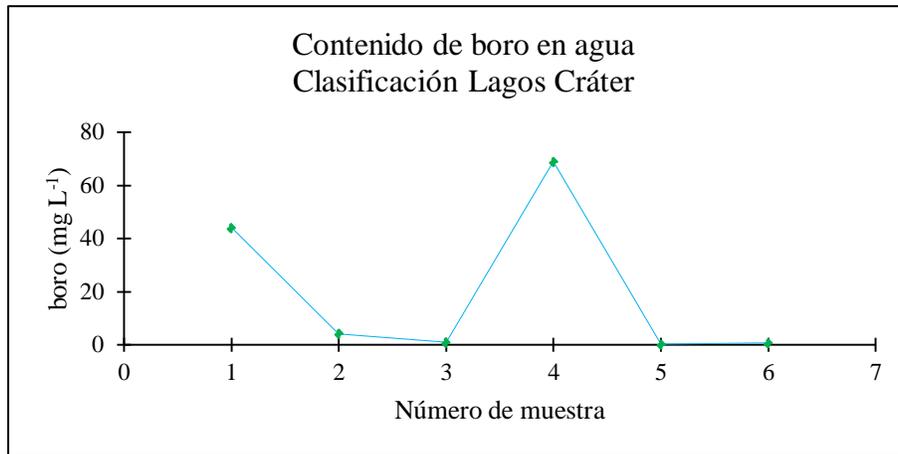


Figura 5-46. Concentración de boro (mg L<sup>-1</sup>) por número de muestra. Clasificación Lagos Cráter

### 5.11.1.4 Clasificación Las Salinas

En la Figura 5-47, se observan las diferentes concentraciones de boro de las 47 muestras de agua, de las cuales solo la muestra número 47 (Río Salado en Las Salinas, Zapotitlán), tiene contenidos permisibles de boro para su uso en la agricultura en cultivos que sean muy tolerantes. El resto de las muestras se encuentra muy por encima del límite máximo permisible de tolerancia de boro para los cultivos agrícolas, por ello no son aptas para su uso.

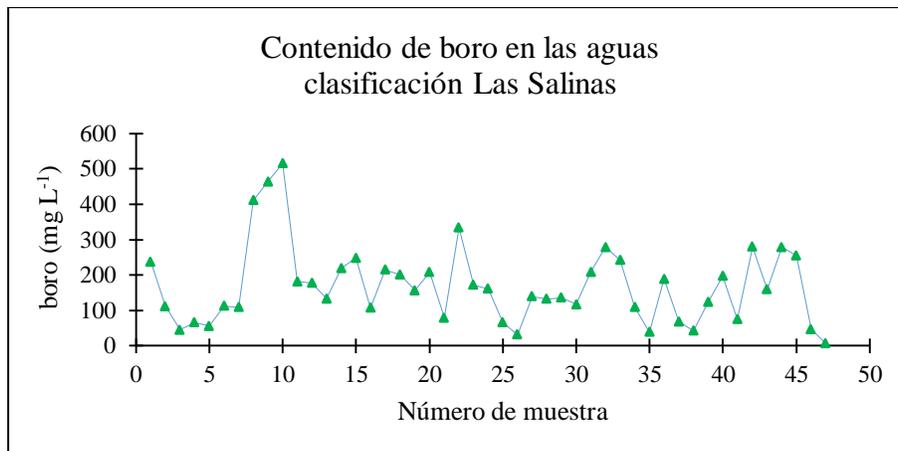


Figura 5-47. Concentración de boro (mg L<sup>-1</sup>) por número de muestra. Clasificación Las Salinas

### 5.11.1.5 Clasificación Pastizal

En la Figura 5-48, se observan las concentraciones de boro de las cuatro muestras de agua, de las cuales el 50% se encuentran en el rango más bajo de tolerancia de menor a  $0.5 \text{ mg L}^{-1}$ , la muestra tres (Los Humeros Geotérmica, Lavaderos, Chignautla) y la muestra número cuatro (Los Humeros Geotérmica, Pila de desagüe Chignautla), se encuentran con valores de 393.33 y  $451.47 \text{ mg L}^{-1}$  respectivamente, valor que sobre pasa el límite máximo permisible de tolerancia de boro para los cultivos agrícolas, por ello no son aptas para su uso. Hem 1985, encontró que en muestras de aguas procedentes de manantiales termales el boro se encuentra en altas concentraciones debido a los efectos térmicos alcanzando resultados de hasta  $660.0 \text{ mg L}^{-1}$  de concentración.

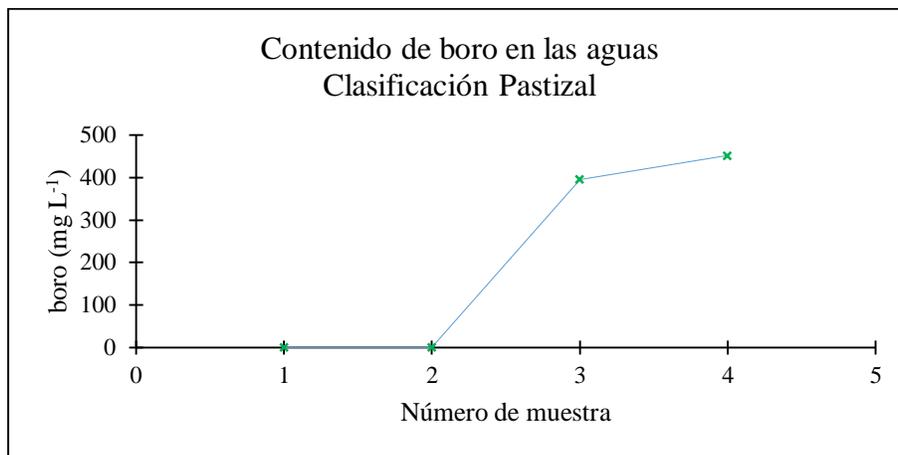


Figura 5-48. Concentración de boro ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Pastizal

### 5.11.1.6 Clasificación Urbano

En la Figura 5-49, se observan las diferentes concentraciones de boro de las tres muestras de agua, de las cuales todas cumplen para su uso en la agricultura, ya que tienen menos de  $0.5 \text{ mg L}^{-1}$  de boro, y puede ser utilizadas en cultivos muy sensibles a éste elemento.

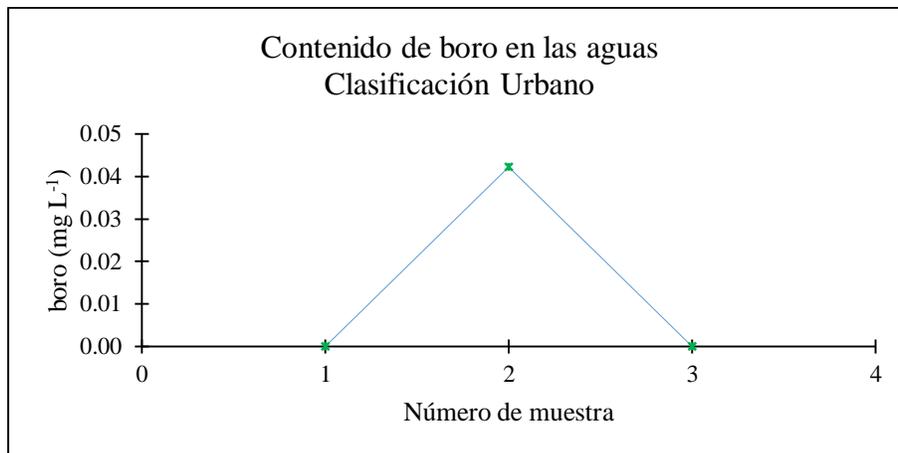


Figura 5-49. Concentración de boro ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Urbano

### 5.11.1.7 Clasificación Vegetación secundaria

En la Figura 5-50, se observan las diferentes concentraciones de boro de las seis muestras de agua, mismas que cumplen con los límites permisibles de concentración de boro para su uso en la agricultura, la muestra número cuatro (Río Axamilma, Axamilma), es la que menor concentración presentó con  $0.31 \text{ mg L}^{-1}$  y la muestra número cinco (Río Blanco, Comunidad Río Blanco, Nogales), es la que mayor concentración de boro presentó con  $8.80 \text{ mg L}^{-1}$

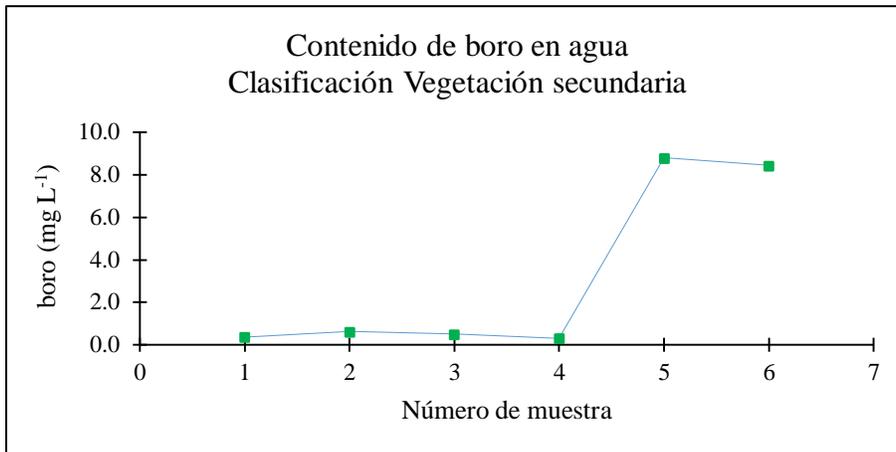


Figura 5-50. Concentración de boro ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Vegetación secundaria

### 5.11.2 Contenido de Fósforo en 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 (Can, 2011).

El fósforo y el nitrógeno, son nutrientes esenciales 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.

A continuación, se muestran las concentraciones de fosfatos en  $\text{mg L}^{-1}$ , presentes en las aguas muestreadas de la región centro-sureste de México, clasificadas con base en el uso de suelo y vegetación.

#### 5.11.2.1 Clasificación Agrícola

En la Figura 5-51, se observan las concentraciones de fosfatos en las aguas muestreadas, el 85.2% de las muestras presentan concentraciones de fosfatos menor a  $1.0 \text{ mg L}^{-1}$ , la muestra número cinco (Nacimiento, balneario el Hocual, Atotonilco) presenta la concentración más baja con  $0.03 \text{ mg L}^{-1}$  y la muestra número 25 (Totolcingo, San Salvador el Seco) presenta la concentración más alta con  $6.74 \text{ mg L}^{-1}$ .

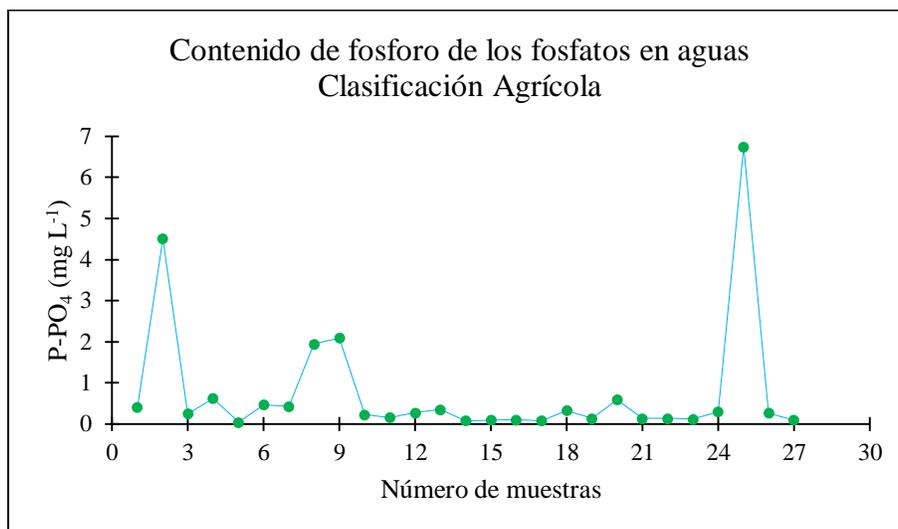


Figura 5-51. Concentración de fósforo de los fosfatos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Agrícola

### 5.11.2.2 Clasificación Bosque

En la Figura 5-52, se observan las concentraciones de fosfatos de las aguas muestreadas, el 100% de las muestras presentan concentraciones de fosfatos menor a  $1.0 \text{ mg L}^{-1}$ , la muestra número uno (Laguna de Nogales, Nogales) presenta la concentración más baja con  $0.081 \text{ mg L}^{-1}$  y la muestra número dos (Río Jamapa) presenta la concentración más alta con  $0.998 \text{ mg L}^{-1}$ .

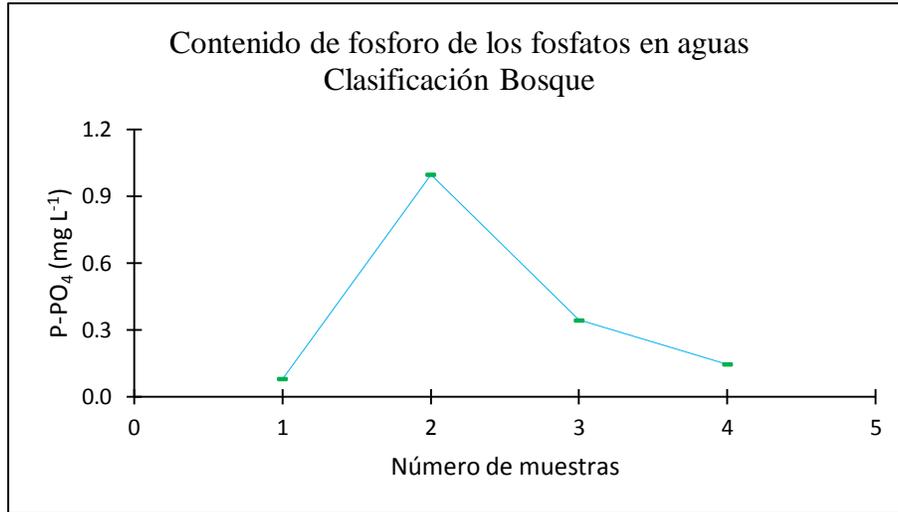


Figura 5-52. Concentración de fosforo de los fosfatos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Bosque

### 5.11.2.3 Clasificación Lagos Cráter

En la Figura 5-53, se observan las concentraciones de fosfatos de las aguas muestreadas, el 100% de las muestras presentan concentraciones de fosfatos menor a  $1.0 \text{ mg L}^{-1}$ , la muestra número uno (Alchichica, San José Alchichica) presenta la concentración más baja con  $0.06 \text{ mg L}^{-1}$  y la muestra número seis (Tecuitlapa, San Miguel Tecuitlapa) presenta la concentración más alta con  $0.82 \text{ mg L}^{-1}$ .

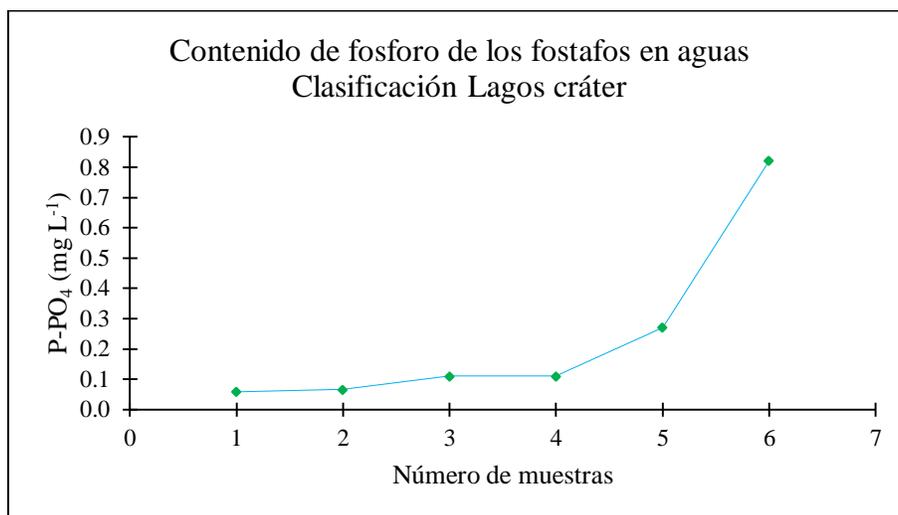


Figura 5-53. Concentración de fosforo de los fosfatos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Lagos Cráter

#### 5.11.2.4 Clasificación Las Salinas

En la Figura 5-54, se observan las concentraciones de fosfatos de las aguas muestreadas, el 74.5% de las muestras presentan concentraciones de fosfatos menor a  $1.0 \text{ mg L}^{-1}$ , la muestra número 22 (Pozo las Sábilas. Las Salinas Hermanos Barragán Huerta, Zapotitlán), 26 (Río el Salado, Zapotitlán), 27 (Pozo el General. Las Salinas Hermanos Barragán Huerta, Zapotitlán) y 28 (Pozo el Márquez. Las Salinas Hermanos Barragán Huerta, Zapotitlán), presenta la concentración más baja con  $0.07 \text{ mg L}^{-1}$  y la muestra número ocho (Pozo 8, Las Salinas Chica, Zapotitlán) presenta la concentración más alta con  $3.92 \text{ mg L}^{-1}$ .

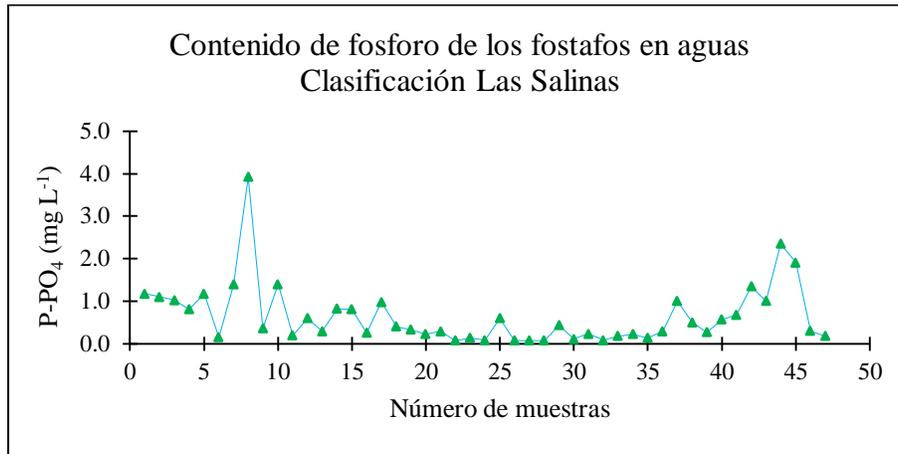


Figura 5-54. Concentración de fosforo de los fosfatos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Las Salinas

#### 5.11.2.5 Clasificación Pastizal

En la Figura 5-55, se observan las concentraciones de fosfatos de las aguas muestreadas, de las cuales, solo la muestra número dos (Río Ixhuacán, Ixhuacán de los Reyes) presentan concentraciones de fosfatos menor a  $1.0 \text{ mg L}^{-1}$ , la muestra número uno (General Ávila Camacho, Valsequillo) presenta la mayor concentración de fosfatos con  $4.437 \text{ mg L}^{-1}$ .

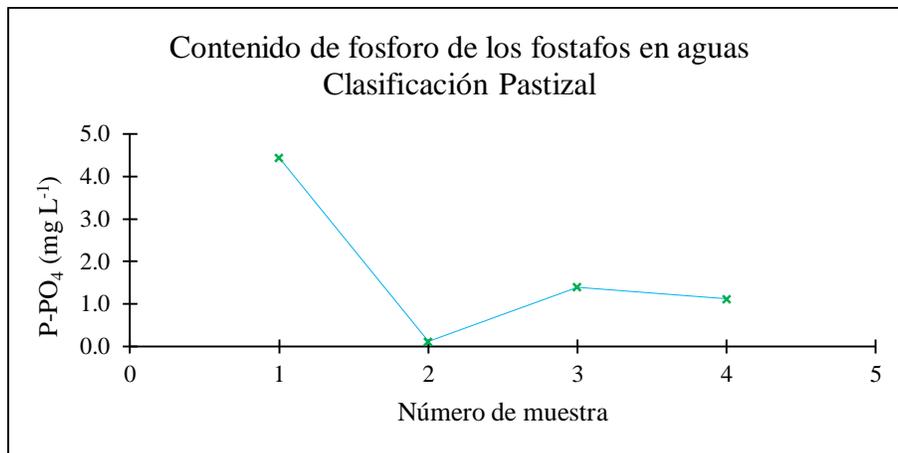


Figura 5-55. Concentración de fosforo de los fosfatos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Pastizal

### 5.11.2.6 Clasificación Urbano

En la Figura 5-56, se observan las concentraciones de fosfatos de las aguas muestreadas, de las cuales el 66.7% de las muestras presentan concentraciones de fosfatos menor a  $1.0 \text{ mg L}^{-1}$ , la muestra número dos (Río Atoyac, Ciudad de Puebla), presenta la concentración más alta con  $4.107 \text{ mg L}^{-1}$ , esto debido a la influencia con drenes de descarga de la ciudad de Puebla.

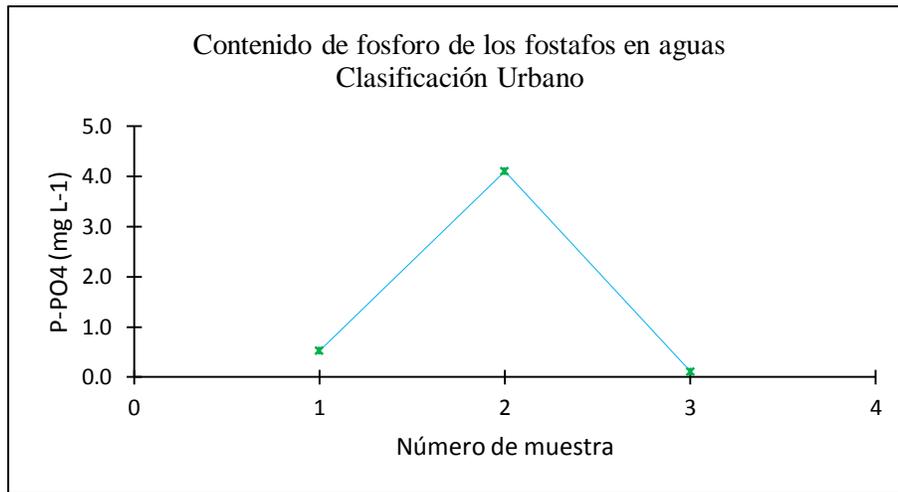


Figura 5-56. Concentración de fosforo de los fosfatos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Urbano

### 5.11.2.7 Clasificación Vegetación Secundaria

En la Figura 5-57, se observan las concentraciones de fosfatos de las aguas muestreadas, el 100% de las muestras presentan concentraciones de fosfatos menor a  $1.0 \text{ mg L}^{-1}$ , la muestra número tres (Nacimiento, Balsa de los Pescaditos, Molcaxac) presenta la concentración más baja con  $0.007 \text{ mg L}^{-1}$  y la muestra número cinco (Río Blanco, Comunidad Río Blanco, Nogales) presenta la concentración más alta con  $0.71 \text{ mg L}^{-1}$ .

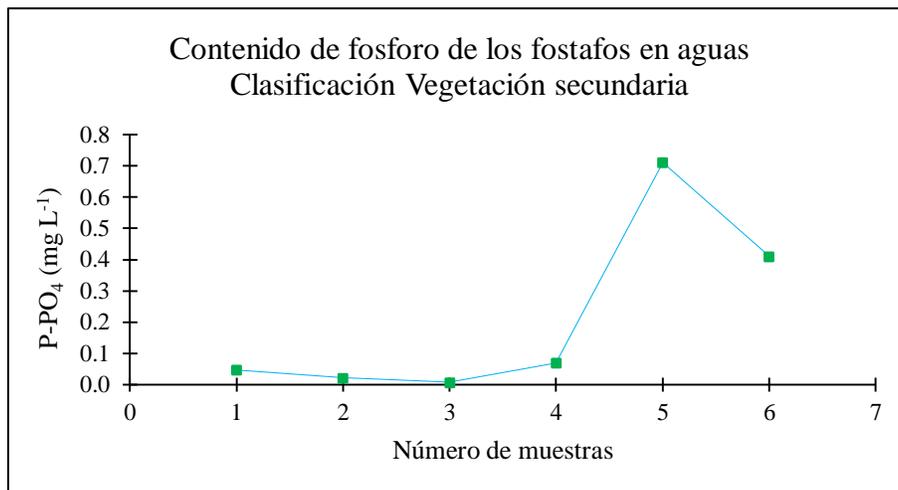


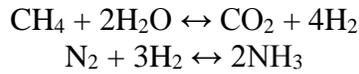
Figura 5-57. Concentración de fosforo de los fosfatos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Vegetación secundaria

### 5.11.3 Contenido de nitrógeno en aguas

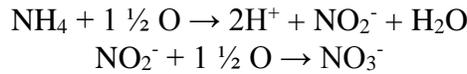
Se determinó el contenido del nitrógeno de los nitratos ( $\text{N-NO}_3^-$ ) en las aguas superficiales y subterráneas muestreadas de la región centro-sureste de México, con la finalidad de conocer los procesos volcánicos que ocurrieron en el Pli-Pleistoceno.

Se presenta el ciclo del nitrógeno en condiciones aeróbicas y anaeróbicas.

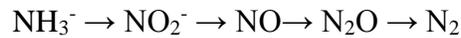
Obtención del amoniaco:



Oxidación del amonio:



Reducción de nitratos:



A continuación, se muestran las concentraciones de nitratos en  $\text{mg L}^{-1}$ , presentes en las aguas muestreadas de la región centro-sureste de México, clasificadas con base en el uso de suelo y vegetación.

#### 5.11.3.1 Clasificación Agrícola

En la Figura 5-58, se observan las concentraciones del nitrógeno de los nitratos en las aguas muestreadas, de las cuales el 63% de las muestras presentan concentraciones menores a  $1.0 \text{ mg L}^{-1}$ , las muestras número tres (Laguna Azul, San Felipe Municipio de Nanacamilpa), diez (Manantial 1, Hacienda Chiautla) y 18 (Río Metlac, Orizaba), no presentaron concentración alguna y la muestra número cuatro (Pozuelos, Nanacamilpa) presenta la concentración más alta con  $3.31 \text{ mg L}^{-1}$ .

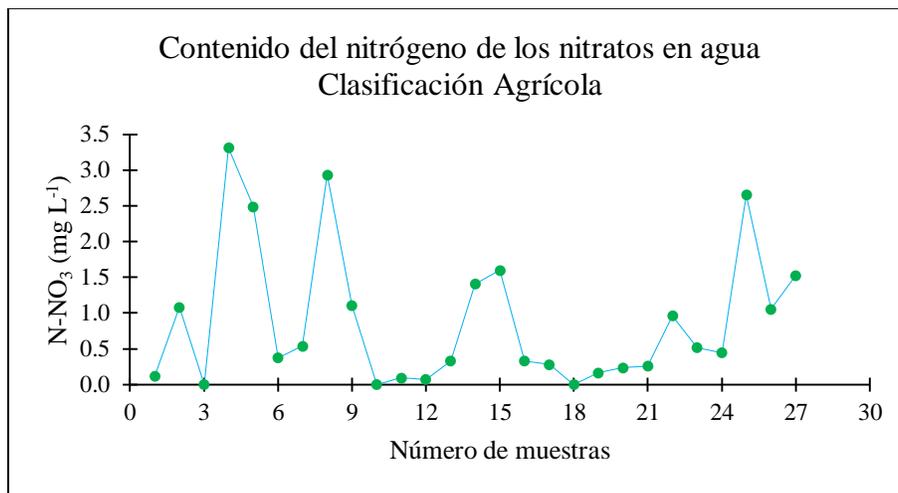


Figura 5-58. Concentración de nitrógeno de los nitratos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Agrícola

### 5.11.3.2 Clasificación Bosque

En la Figura 5-59, se observan las concentraciones del nitrógeno de los nitratos en las aguas muestreadas, de las cuales el 100% de las muestras presentan concentraciones menores a 1.0 mg L<sup>-1</sup>, las muestras número cuatro (Río s/n, Puente Ruiz Cortines, Rancho Dos Puentes), no presentaron concentración alguna y la muestra número tres (Puente Río Jamapa) presenta la concentración más alta con 0.40 mg L<sup>-1</sup>.

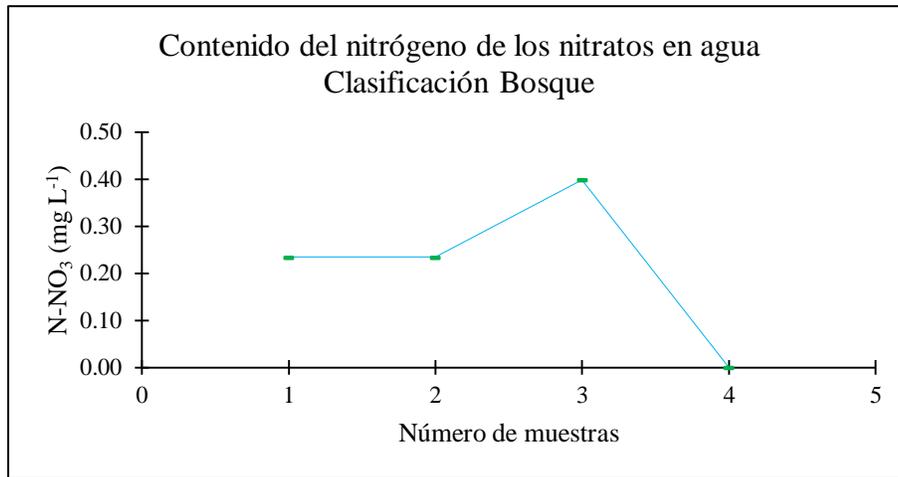


Figura 5-59. Concentración de nitrógeno de los nitratos (mg L<sup>-1</sup>) por número de muestra. Clasificación Bosque

### 5.11.3.3 Clasificación Lagos cráter

En la Figura 5-60, se observan las concentraciones del nitrógeno de los nitratos en las aguas muestreadas, de las cuales el 50% de las muestras presentan concentraciones menores a 1.0 mg L<sup>-1</sup>, las muestras número uno (Alchichica, San José Alchichica), presenta la concentración más baja con 0.28 mg L<sup>-1</sup>, y la muestra número seis (Tecuitlapa, San Miguel Tecuitlapa) presenta la concentración más alta con 2.54 mg L<sup>-1</sup>.

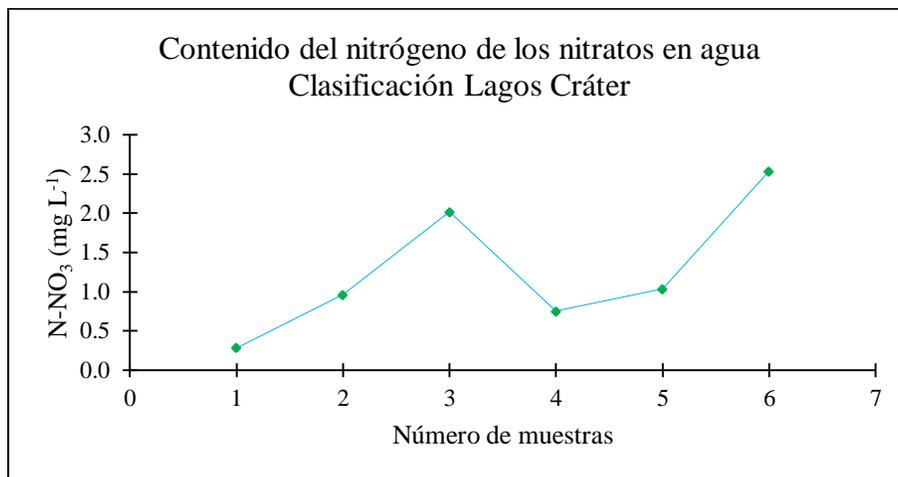


Figura 5-60. Concentración de nitrógeno de los nitratos (mg L<sup>-1</sup>) por número de muestra. Clasificación Lagos Cráter

### 5.11.3.4 Clasificación Las Salinas

En la Figura 5-61, se observan las concentraciones del nitrógeno de los nitratos en las aguas muestreadas, de las cuales el 76.6% de las muestras presentan concentraciones menores a 1.0 mg L<sup>-1</sup> y el 30% no presenta concentración alguna, la muestra número uno (Pozo 1, Las Salinas Chica, Zapotitlán) presenta la concentración más alta con 4.58 mg L<sup>-1</sup>.

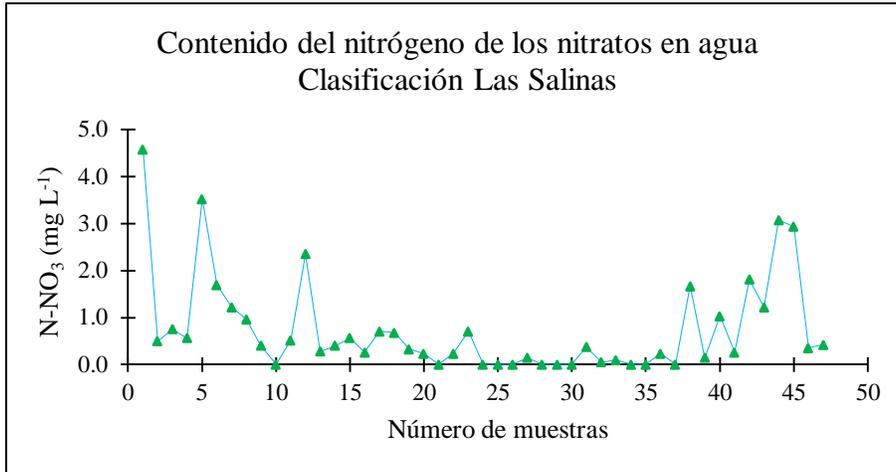


Figura 5-61. Concentración de nitrógeno de los nitratos (mg L<sup>-1</sup>) por número de muestra. Clasificación Las Salinas

### 5.11.3.5 Clasificación Pastizal

En la Figura 5-62, se observan las concentraciones del nitrógeno de los nitratos en las aguas muestreadas, de las cuales el 50% de las muestras presentan concentraciones menores a 1.0 mg L<sup>-1</sup>, la muestra número cuatro (Los Humeros Geotérmica, Pila de desagüe Chignautla), presenta la concentración más baja con 0.45 mg L<sup>-1</sup> y la muestra número tres (Los Humeros Geotérmica, Lavaderos, Chignautla) presenta la concentración más alta con 1.36 mg L<sup>-1</sup>.

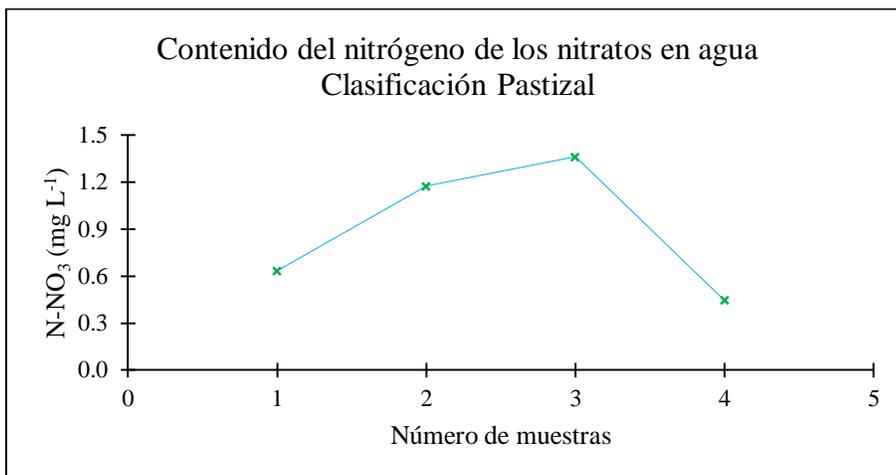


Figura 5-62. Concentración de nitrógeno de los nitratos (mg L<sup>-1</sup>) por número de muestra. Clasificación Pastizal

### 5.11.3.6 Clasificación Urbano

En la Figura 5-63, se observan las concentraciones del nitrógeno de los nitratos en las aguas muestreadas, de las cuales la muestra número uno (Almacenamiento Superficial, Comunidad Francisco Villa), presenta la concentración más baja con  $0.35 \text{ mg L}^{-1}$  y la muestra número tres (Río Xico, Xicotepec), presenta la concentración más alta con  $1.17 \text{ mg L}^{-1}$ .

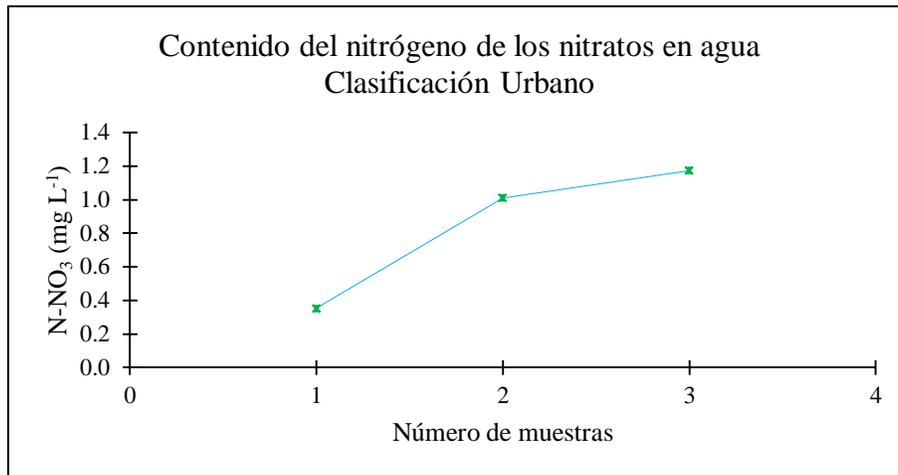


Figura 5-63. Concentración de nitrógeno de los nitratos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Urbano

### 5.11.3.7 Clasificación Vegetación secundaria

En la Figura 5-64, se observan las concentraciones del nitrógeno de los nitratos en las aguas muestreadas, de las cuales el 66.7% de las muestras presentan concentraciones menores a  $1.0 \text{ mg L}^{-1}$ , la muestra número cuatro (Río Axamilma, Axamilma), presenta la concentración más baja con  $0.12 \text{ mg L}^{-1}$  y la muestra número dos (Nacimiento, entrada puente de Dios, Molcaxac) presenta la concentración más alta con  $6.60 \text{ mg L}^{-1}$ .

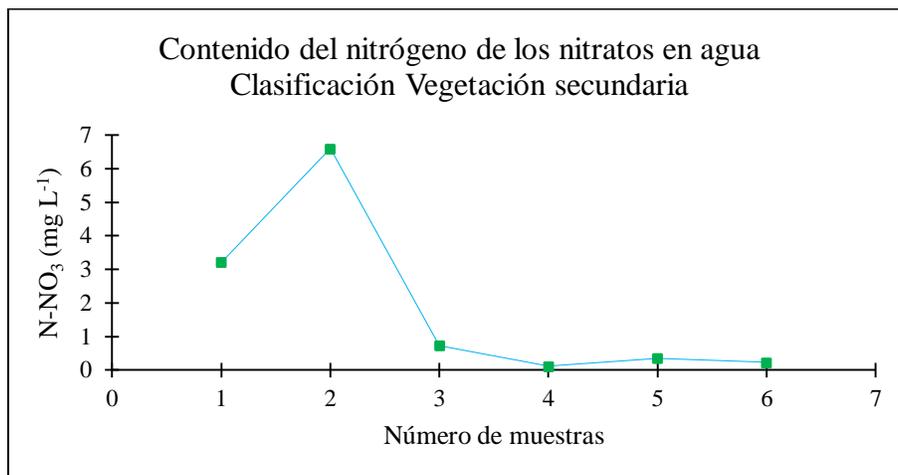


Figura 5-64. Concentración de nitrógeno de los nitratos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) por número de muestra. Clasificación Vegetación secundaria

## 6 CONCLUSIONES

La región centro-sureste de México conformada por los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz, presentan diferentes concentraciones de sales en aguas subterráneas y superficiales, la clasificación con base en el uso de suelo y vegetación que predomina sobre microcuencas donde se colectaron las muestras de agua nos ayuda a generar una posible idea sobre el uso del agua en la agricultura, siempre y cuando el agua no sea subterránea.

Esta clasificación de agua, presentó diferentes concentraciones, relaciones, índices y características de sales, mencionadas a continuación:

1.- Se encontró que, para la clasificación de las muestras de agua tipo agrícola, predominan los iones; magnesio con 74% y calcio 36% (Cationes), y bicarbonato con 65.2% (anión), el pH se encuentra en promedio ligeramente alcalino con 7.99. Predomina el tipo de salinización clorhídrica en un 81%, presenta el 89% en índice de salinidad efectiva buena y el 96% en salinidad potencial buena. Presenta baja sodicidad y baja salinidad en todas las muestras a excepción de la muestra 25 (Laguna de Totolcingo, San Salvador el Seco) y la muestra número 27 (Manantial 2 el Carmen, el Carmen Tequexquitla), con concentraciones muy altas de sales no aptas para su uso agrícola. Las concentraciones de boro en las muestras de agua indican que el 70% de las aguas pueden ser utilizadas en cultivos muy sensibles debido a sus bajas concentraciones, sin embargo, el 18.5% de las muestras presentan concentraciones altas que sólo son aptas en cultivos tolerantes. Se encontró la concentración más alta de fosfatos en la muestra número 25 con 6.748 mg L<sup>-1</sup> de todas las clasificaciones de usos de suelo y vegetación.

2.- Para la clasificación de las muestras de agua de tipo bosque, los iones predominantes son calcio con 49.9% y magnesio con 48.6% (Cationes), y bicarbonato con 71.7% (anión), presentan un pH promedio de 7.59, predomina el tipo de salinización clorhídrica en un 75%, presenta el 100% en índice de salinidad efectiva buena y el 100% en salinidad potencial buena. El 75% de las muestras presentan baja salinidad y el 100% son de baja sodicidad, debido a que no se encontró sodio ni carbonato en las muestras. Con base en el contenido del boro, el agua se puede emplear en cultivos agrícolas tolerantes y muy tolerantes a este elemento. Por su parte el contenido del fósforo de los fosfatos y el nitrógeno de los nitratos fue de concentraciones bajas.

3.- La clasificación de las muestras de agua de los lagos cráter, presentó iones predominantes de magnesio en 42.7% y sodio en 50.9% (Cationes), Cloro en 37.2% y bicarbonato en 32.7% (Anión), el pH es alcalino con 8.94. Predomina el tipo de salinización clorhídrica en un 83%, sólo la muestra número seis (Lago cráter Tecuitlapa, San Miguel Tecuitlapa) presenta salinización sulfática, el 50% de las muestras presentan aguas altamente salinas y el 50% son aguas muy altamente salinas, la muestra número uno (Alchichica, San José Alchichica), presenta agua altamente sódica y la muestra número seis (Tecuitlapa, San Miguel Tecuitlapa), presenta agua muy altamente sódica. Para las concentraciones de boro el 33% de las muestras se encuentran con altas concentraciones, siendo toxico para cuál cualquier cultivo, con respecto al fosforo de los fosfatos y el nitrógeno de los nitratos, las muestras presentan concentraciones bajas. Con respecto a ello, no se recomienda su uso en la agricultura.

4.- Se encontró que, las muestras de agua las Salinas, son altamente sódicas debido a que predominan los iones; sodio con 94.4% (Cación) y Cloro con 66.9% (Anión), solo la muestra número 47 (Río Salado en Las Salinas, Zapotitlán) no presenta altos niveles debido a que no se encuentra evaporada y a la unión con otras corrientes de agua. El pH se encuentra en alcalino con 8.6. Predomina el tipo de salinización clorhídrica en un 98%, presenta el 98% en índice de salinidad efectiva no recomendable y el 98% en salinidad potencial no recomendable. Presenta alta sodicidad y alta salinidad en todas las muestras a excepción de la muestra número 47 (Río Salado en Las Salinas, Zapotitlán), que presenta bajos niveles en salinidad y sodicidad. En general estas aguas no son aptas para su uso agrícola. Las concentraciones de boro en las muestras de agua indican que alta concentración, la muestra número diez (Etapa Final, Las Salinas Chica, Zapotitlán), es la de mayor concentración con 515.02 mg L<sup>-1</sup>.

5.- Para la clasificación de las muestras de agua de tipo pastizal, los iones predominantes son calcio con 31.9%, sodio con 31.3% y magnesio con 27.3% (Cationes), y bicarbonato con 57.1% y cloro con 29.0% (aniones), el sodio presente es debido a las muestras número tres y cuatro son de origen de manantiales geotérmicos. Predomina el tipo de salinización clorhídrica en un 50%, presenta el 75% en índice de salinidad efectiva condicionada y el 75% en salinidad potencial buena. El 50% de las muestras presentan baja salinidad y el 50% alta salinización, el 75% son de baja sodicidad. Con base en el contenido del boro, el agua de origen manantial geotérmico no es apta para su uso en la agricultura por su alta concentración de éste elemento. Por su parte el

contenido del fósforo de los fosfatos fue de concentraciones bajas a altas y el nitrógeno de los nitratos fue de concentraciones bajas.

6.- Se encontró que, para la clasificación de las muestras de agua tipo urbano, predominan los iones; calcio con 55.4% y magnesio con 33.5% (Cación), y bicarbonato con 48.8% y Cloro con 29.6% (anión). El pH se encuentra en promedio 7.30. Presenta el 100% en índice de salinidad efectiva buena y el 100% en salinidad potencial buena. El 67% de las muestras presentan baja salinidad y el 33% de salinidad media, el 100% son de baja sodicidad, debido a que no se encontró sodio ni carbonato en las muestras. Con base en el contenido del boro, el agua se puede emplear en cultivos agrícolas muy sensibles a este elemento. Por su parte el contenido de fosfatos sólo se observó alto en la muestra número dos (Río Atoyac, Ciudad de Puebla), esto debido a su paso por zonas urbanas, el nitrógeno de los nitratos fue de concentraciones bajas.

7.- La clasificación de las muestras de agua de vegetación secundaria, presentó iones predominantes de magnesio con 53.2% y sodio con 25.7% (Cación), bicarbonato en 60.2% y carbonato en 38.8% (Anión), el pH es ligeramente alcalino con 8.21, no presenta salinización debido a que no se encontró el ion cloruro, predomina el tipo de salinización clorhídrica en un 75%, presenta el 50% en índice de salinidad efectiva buena y el 50% en salinidad efectiva condicionada y el 100% en salinidad potencial buena. El 50% de las muestras presentan salinidad media y el otro 50% presenta altamente salina, el 100% de las muestras son de baja sodicidad. Con base en el contenido del boro, el agua se puede emplear en cultivos agrícolas sensibles, muy sensibles y muy tolerantes a este elemento. Por su parte el contenido de fosfatos presentó concentraciones bajas y en el nitrógeno de los nitratos las muestras fueron bajas a excepción de la muestra número dos (Nacimiento, Entrada Puente de Dios, Molcaxac), que fue de mayor concentración.

## **7 RECOMENDACIONES**

1.- Con la finalidad de conocer las concentraciones y variaciones de sales a lo largo del año en las fuentes puntuales de aguas de la región centro-sureste de México, conformada por los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz, es necesario monitorearlas y analizarlas en temporada de lluvia y en temporada de estiaje.

2.- Seguir realizando muestreos de las aguas que se encuentran cercanas a las muestras colectadas, con la finalidad de ampliar los conocimientos sobre origen de los tipos de sales presentes en aguas.

3.- Ampliar la investigación mediante muestreos y análisis físico-químicos de suelos agrícolas de la región, con la finalidad de darle un uso adecuado al agua en la agricultura.

4.- Realizar análisis de metales pesados en agua para evitar el daño al ecosistema prolongado en el uso agrícola.

## 8 LITERATURA CITADA

- Antipov-Karataev, I.N. (1967). Reclamation of Solonetz soils in the USSR. Israel Program for Scientific Translation. Jerusalén.
- APHA. American Public Health Association. (1989). Standard methods for the examination of water and wastewater. 17th Edition. Port City Press. Baltimore, MD, USA.
- APHA. American Public Health Association. (1995). WPCF, Standard methods for the examination of water and wastewater (Vol.2). Washington DC, USA: American Public Health Association.
- 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. FAO. Roma, Italia. p. 1-81.
- Belillas C. M. y Roda F. (1993). The effects of fire on water quality, dissolved nutrient losses and the export of particulate matter from dry heathland catchments. *Journal of Hydrology*. Vol 150. España. 1-17 p.
- Bernstein, L. and Francois, L.E. (1973). Leaching requirement studies: sensitivity of alfalfa to salinity of irrigation and drainage waters. *Soil Science Soc. Amer. Proc.*, Vol. 37.
- Bower C. A. y Maasland, M. (1963). Sodium Hazards of Punjab Groundwater, West Pakistan Engineering Congress Proceeding, Vol. 50, 1963, pp. 49-61
- Bower, C. A y Wilcox, L. V. (1965). Precipitation and solution of calcium carbonate in irrigation operations. *Soil Science Soc. Amer. Proc.* 29:93-94.
- Bower, C. A. and Maasland. (1963). Sodium hazard of Punjab ground waters. *West Pakistan Eng. Congr. Proc.* 50: 49-61.
- Bower, C.A. and Wilcox, L.V. (1965) Soluble Salts. In: Black, C.A., et al., *Methods of Soil Analysis*, American Society of Agronomy, Madison, 933-940.
- Brooks, KN; Ffolliott, PF; Gregersen, HM; Thames, JL. (1991). *Hidrology and the management of watersheds*. Primera edición. Iowa, USA. Iowa State University Press/Ames. 392 p.

- Buch, MW Von. (1988). Degradation of ignimbrite soils and the destruction of pine forest in Honduras. *Plant Research and Development, Biannual Collection*, 28:32-46.
- Can Chulim, Álvaro. (2011). Calidad de las aguas para riego en la cuenca del oriental y sierra norte, Estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Tesis Doctoral, Posgrado en Hidrociencias. Colegio de Postgraduados, Área de Hidrociencias. Montecillos, Texcoco, México. pp. 209.
- Clarke, F. W. (1924). The data of geochemistry, 5th ed. U.S. Geol. Serv. Bull. 770.
- Comisión Nacional del Agua, (2015): Atlas del Agua en México. Conagua. Documento disponible en:<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/ATLAS2015.pdf>
- Consejo Consultivo del Agua (2016). Panorama del Agua en México. Documento disponible en: <http://www.aguas.org.mx/sitio/index.php/panorama-del-agua/agua-en-mexico>
- Custodio E., y Llamas M. R., (1976). Hidrología subterránea. Universidad Politécnica de Barcelona. Tomo 1, primera edición. Ediciones Omega. pp.190-2010.
- Doneen, L. D. (1975). Water quality for irrigation agricultura. Springer Verlag. New York, USA
- Doneen, L. O. (1958). Quality of water for irrigation. pp: 208. *In*: L. D. Doneen (ed). 1958. Proc. Conf. on Quality of Water for Irrigation No. 14. Water Resources Center. California, USA.
- 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.
- Eaton, F. M. (1950). Significance of carbonates in irrigation water. *Soil Science* 69(2): 123-133.
- Eghball, B; Gilley, JE; Kramer, La; Moorman, TB. (2000). Narrow grass hedge effects on phosphorus and nitrogen in runoff following manure and fertilizer application. *Journal of Soil and Water Conservation*, Second Quarter: 172-176.
- ESRI (2013). ArcGis (10.4.1) "software". ArcGIS® y ArcMap™ son propiedad intelectual de Esri y se utilizan aquí bajo licencia. Copyright © Esri. Todos los derechos reservados. Para

- obtener más información sobre el software Esri®, visite [www.esri.com](http://www.esri.com) (Consultado en julio de 2017).
- Eugster, H. P. y Jones, B. (1979). Behavior of Major Solutes during closed-basin brine evolution. *American Journal of Science*, Vol. 279, 609- 631
- Fajardo, JJ; Bauder, JW; Cash, SD. (2001). Managing nitrate and bacteria in runoff from livestock confinement areas with vegetative filter strips. *Journal of Soil and Water Conservation*, 56(3): 185-191.
- FAO-UNESCO (1993). *Irrigation, Drainage and Salinity. An International Source Book*. Paris/Unesco Hutchinson & Co (Publishers) LTD 3 Fitzroy Square, London W1
- Faustino, J. (1997). Agua: recurso estratégico en el futuro de América Central. *Revista Forestal Centroamericana* no. 18:6-12.
- Fernández Cirelli, A., (2012). El agua: un recurso esencial. Instituto Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua (CETA). Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Universidad de Buenos Aires. *Revista Química Viva - Número 3*.
- Fine, L. O., E. J. Williamson, F. Wiersma and C. R. Umback. (1959). A study of the sodium adsorption ratio and residual sodium carbonate concepts of irrigation waters as they affect exchangeable sodium of soils under semiarid conditions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 263-266.
- García M., E. (1988). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. SIGSA. Distrito Federal, Méx. 217 p.
- Gméling, K., K. Németh, U. Eby and Z. Varga. 2007. Boron concentrations of volcanic fields in different geotectonic settings. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 159: 70-84.
- Gregg R. Davidson (1995). The stable isotopic composition and measurement of carbon in soil CO<sub>2</sub>. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. USA. Volume 50, 2485-2489 pp

- Hem, J.D. (1985) Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. 3rd Edition, US Geological Survey Water-Supply Paper 2254, University of Virginia, Charlottesville, 72 p.
- Hudson, J; Kellman, M; Sanmugadas, K; Alvarado, C. (1983). Prescribed burning of *Pinus oocarpa* in Honduras: II. Effects on nutrient cycling. *Forest Ecology and Management*, 5:283-300.
- INEGI (2005). Conjunto de datos vectorial geológicos escala 1:250 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática. Consultado en julio de 2017. Recuperado de <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/geologia/>
- INEGI (2012). Conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación Escala 1:250 000, Serie V. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática. Consultado en julio de 2017. Recuperado de <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463173359>
- INEGI (2013). Continental - Continuo de elevaciones mexicano, versión 3.0. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática. Consultado en julio de 2017. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/>
- Infante-Gil S. y G. P. Zarate de Lara, (2012). *Métodos Estadísticos, un enfoque interdisciplinario*. 3ra. Ed. Editorial Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. México. 610 p.
- Jenkis D. y Vernon L., (1999), *Química del Agua*. Editorial Limusa, México D.F. 508 p.
- Jhon D. Hem (1985). Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Survey. library of Congress Catalog-Card No. 85. Third Edition. Pp 122-129.
- Juárez D, E. O. (2015). Caracterización hidrogeoquímica de las salinas y aguas del Valle de Tehuacán, Puebla. Tesis de Maestría, Posgrado en Hidrociencias. Colegio de Postgraduados, Área de Hidrociencias. Montecillos, Texcoco, México. pp. 100.
- Juo, A; Manu, A. (1996). Chemical dynamics in slash-and-burn agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 58:4-60.

- Kilham, P., (1971b). Biogeochemistry of African lakes and rivers. Ph.D. thesis, Duke Univ., Durham (N.C.), 199 pp.
- Kilham, P., (1984). Sulfate in African inland waters: sulfate to chloride ratios. *Verh. int. Ver. Limnol.* 22: 296-302.
- 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.
- Line, DE; Harman, WA; Jennings, GD; Thompson, EJ, Osmond, DL. (2000). Nonpoint-source pollutant load reductions associated with livestock exclusion. *Journal of Environmental Quality* 29: 1882-1890.
- Livingstone D. A. (1961). Chemical composition of rivers and lakes. In: *Data of geochemistry. Chapter G. sixth edition.* (Fleischer M. Editor). Geological Survey Professional Paper 440-G. Washington. 63 p.
- Maas, E. V. (1990). Crop salt tolerance pp: 262-304. *In:* K. K. Tanji (ed.). *Agricultural salinity assessment and management.* ASCE New York, USA.
- Madgwick, H.A.I. y Ovington, J.D. (1959). The chemical composition of precipitation in adjacent forest and open plots. *J. For.* 32 (1): 14-22.
- Manahan, S., (1991 b), *Environmental Chemistry, Tomo II,* Lewis Publishers, 5th ed., USA.
- 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.
- Mitchell, M; Stapp, W; Bixby, K. (1991). *Manual de campo de Proyecto del Río: una guía para monitorear la calidad del agua en el Río Bravo. Segunda edición.* Proyecto del Río. New Mexico, USA. 200p.

- Müller, G., Irion, G. & Förstner, U (1972). Formation and diagenesis of inorganic Ca-Mg carbonates in the lacustrine environment. *Naturwissenschaften* 59, 158-164.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). (1998). Guías para la calidad del agua potable: vigilancia y control de los abastecimientos de agua a la comunidad. Segunda edición. Volumen 3. OMS, Ginebra, 1998. 255 p.
- Ongley, E.D. (1997). Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Roma, Italia. Estudio FAO Riego y Drenaje 55, 1997. 116 p.
- Organización de las Naciones Unidas- Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de Naciones Unidas (2014). Documento disponible en: <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/world-population-prospects-2017.html>
- Oster J.D. and Schroer F.W. (1979). Infiltration as influenced by irrigation water quality. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 43:444–447.
- Oster, J.D. y Rhoades, J.D. (1986). Water management for salinity and sodicity control. Chapter 7. Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater. Davis, California, U.S.A
- Pinder, L.C.V y Farr, I.S. (1987a). Biological surveillance of water quality. 2. Temporal and spatial variation in the macroinvertebrate fauna of the river Frome, a Dorset chalk stream. *Archiv für Hydrobiologie* 109 (3): 321-331
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analysis. *Am. Geophys. Union Trans.* 25: 914-923.
- Postel, S. (1997). Last Oasis: Facing Water Scarcity. Worldwatch Institute y W.W. Norton.
- Radulovich, R. (1997). Sostenibilidad en el uso del agua en América Latina. *Revista Forestal Centroamericana* no. 18:13-17.
- Richards L.A. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Agricultural Handbook No. 60, US Department of Agriculture, Washington DC. 160 p.

- Richards, L. (1973). Suelos salinos y sódicos. Manual 60: Laboratorio de salinidad de los Estados Unidos de América.
- Richards, L. A. (1990). 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 and B. Johnson. (1983). Water and waste water analysis for nitrate via nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 14(12): 1207-1215.
- Rodier, J. (1978). Análisis de las aguas Barcelona, España: Ediciones Omega 100-120 p.
- Rodier, J. (1990). Análisis de las aguas. Segunda reimpresión. Ediciones Omega, Barcelona, España. 186-191 p.
- Rodríguez O. J. C., J. L. García H., R. D. Valdez C., J. L. Lara M., H. Rodríguez F., C. Loredó O. (2009). Calidad agronómica de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Tropical and subtropical agroecosystems*. 10 (3): 355-367
- Sanders, T.G; Ward, R.C; Loftis, J.C; Steele, T.D; Adrian, D.D y Yevjevich, V. (1983). Design of net- works for monitoring water quality. Water ResourCE Pub Littleton, CO.
- Santoyo D. M. F. (2016). Composición iónica del agua del bosque de niebla de Veracruz-Puebla. Tesis de Maestría, Posgrado en Hidrociencias. Colegio de Postgraduados, Área de Hidrociencias. Montecillos, Texcoco, México. pp. 120.
- Seilsepour, M., M. Rashidi and B. G. Khabbaz. (2009). Prediction of soil exchangeable sodium percentage based on soil sodium adsorption ratio. *American Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.* 5(1): 01-04.
- SEMARNAT/CONAGUA (2011). Estadísticas del agua en México, edición 2011. Documento disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-1-11-EAM2011.PDF>

- Seoáñez, M. (1999). Ingeniería del medioambiente aplicada al medio natural continental. Segunda edición, Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 702 p.
- Servicio Meteorológico Nacional, CDMX (2017). Proyecto de bases de datos: Servicio Meteorológico Nacional. Consultado en julio de 2017. Recuperado de <http://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Diarios/>
- Servicio Meteorológico Nacional. México, DF (2010). Base de datos climática nacional. Sistema de Información Climática Computadorizada (CLICOM). Consultado en julio de 2017. Recuperado de <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>
- Stumm, W. y Morgan, J.J. (1995). Aquatic Chemistry, 3rd, ed., John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Symoens J.-J. (1968). The mineral content of natural waters. Cercle Hydrobiol. Brux. 2: 1-199.
- Tamm Carl Olof. (1951). Removal of Plant Nutrients from Tree Crowns by Rain. Physiologia Plantarum, Vol. 4, Forest Research Institute of Sweden, Experimental Faltet. pp. 184-188
- Toledo Alejandro (2002). El Agua en México y en el Mundo. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Gaceta Ecológica, núm. 64, julio-septiembre, 2002. Distrito Federal, México pp. 9-18
- Torres C. V. M. (2018). Índices de salinidad y calidad de las aguas superficiales de las cuencas de los ríos Atoyac, Jamapa, Moctezuma y Papaloapan. Tesis de Maestría, Posgrado en Hidrociencias. Colegio de Postgraduados, Área de Hidrociencias. Montecillos, Texcoco, México. pp. 74.
- TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerios del Medio Ambiente. (1998). Restauración hidrológica forestal de cuencas y control de la erosión. Ediciones mundi prensa Madrid España.
- Velázquez M., M. A., M. Ortega E., A. Martínez G., J. Kohashi S. y N. García C. (2002). Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Terra 20: 459-464.

- Velázquez-Machuca M. A., J. L Pimentel Equihua, y M. Ortega-Escobar. (2010). Variaciones longitudinales y temporales en la hidroquímica del río Duero. *Agrociencias* 44: 599-609.
- Vidal, M; López, A; Santoalla, MC; Valles, V. (2000). Factor analysis for the water resources contamination due to the use of livestock slurries as fertilizer. *Agricultural Water Management*, 45:1-15.
- Von Damm, K.L., and J. M. Edmond. (1984). Reverse weathering in the closed-basin lakes of the Ethiopian Rift and in Lake Turkana (Kenya), *Am. J. Sci.* 284: 835-862.
- Wetzel R. (1983). *Limnology*, 2nd ed. Saunders, Philadelphia.
- WWDR (2016). Agua y Empleo. Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016. Documento disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002441/244103s.pdf>
- Zaporozec, A. (1972). Graphical interpretation of water-quality data. *Ground Water*, 10(2): 32-43.
- Zhao, SL; Gupta, SC; Huggins, DR; Moncrief, JF. (2001). Tillage and nutrient source effects on surface and subsurface water quality at corn planting. *Journal Environment of Quality*, 30:998-1008.