



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS**

## **CALIDAD DE LAS AGUAS PARA RIEGO EN LA CUENCA DEL ORIENTAL Y SIERRA NORTE, ESTADOS DE PUEBLA, TLAXCALA Y VERACRUZ**

**ÁLVARO CAN CHULIM**

**T E S I S**  
**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL**  
**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**DOCTOR EN CIENCIAS**

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

2011

La presente tesis, titulada: **Calidad de las aguas para riego en la Cuenca del Oriental y Sierra Norte, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz, realizada por el alumno: Álvaro Can Chulim**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS  
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar

ASESOR:



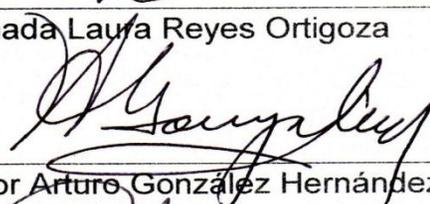
Dra. Norma Eugenia García Calderón

ASESOR:



Dra. Amada Laura Reyes Ortigoza

ASESOR:



Dr. Víctor Arturo González Hernández

ASESOR:



Dr. David Flores Román

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Mayo de 2011.

# CALIDAD DE LAS AGUAS PARA RIEGO EN LA CUENCA DEL ORIENTAL Y SIERRA NORTE, ESTADOS DE PUEBLA, TLAXCALA Y VERACRUZ

Álvaro Can Chulim, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2011

En el estado de Puebla el agua es de gran importancia, ya que condiciona fuertemente la posibilidad de incrementar el desarrollo económico. La mayor proporción de agua subterránea disponible se encuentra en la Cuenca del Oriental, la cual abarca porciones del estado de Tlaxcala y Veracruz. Con respecto a las aguas superficiales, la mayor proporción en el estado de Puebla se encuentra en la Sierra Norte. El agua es empleada principalmente en la agricultura, seguida de la industria, geotermia, acuicultura y terapia. Para establecer las características físico-químicas de estas aguas, se planteó una investigación de tipo observacional, prospectiva, transversal y descriptiva. Desde la perspectiva agrícola, mediante la asociación de variables físico-químicas específicas medidas en las aguas se hace inferencia sobre los niveles de sodio intercambiable en los suelos que son regados con estas aguas, además de establecer efectos cuantitativos de las concentraciones iónicas en los cultivos. Las variables de mayor relevancia son: pH, CE, RAS, PSI y B. Los valores obtenidos, expresados en máximos y mínimos, son: 1. Cuenca del Oriental: pH = 9.7-7.2, CE = 13 258-79  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , RAS = 124.55-0.06, PSI = 67.79-0.06, B = 13.4-0.0 mg L<sup>-1</sup>; Los valores máximos de CE pertenecen a los lagos cráter y los de B a la caldera Los Humeros. 2. Sierra Norte: pH = 9.4-2.5, CE = 1913-61  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , RAS = 24.76-0.01, PSI = 29.50-0.01, B = 7.8-0.0 mg L<sup>-1</sup>; los valores mínimos de pH y máximos de B pertenecen a la caldera de Acoculco. La calidad del agua y su uso es definida por las concentraciones iónicas parciales y totales. Las aguas son bicarbonatadas, por lo que modifican los contenidos de sodio. El carácter químico del agua es resultado principal de los procesos físico-químicos del agua con la geología regional.

*Palabras clave: RAS, PSI, lagos cráter, Los Humeros, Acoculco.*

# WATER QUALITY FOR IRRIGATION OF THE CUENCA DEL ORIENTAL AND SIERRA NORTE, STATES OF PUEBLA, TLAXCALA AND VERACRUZ

Álvaro Can Chulim, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2011

In the state of Puebla, water is of great importance, since it affects strongly the possibility of increasing economic development. The greater proportion of available groundwater is in the Cuenca del Oriental, which covers portions of the state of Tlaxcala and Veracruz. With respect to surface water, the highest proportion in the state of Puebla is located in the Sierra Norte. Waters are used mainly in agriculture, followed by industry, geothermal energy, aquaculture and therapy. To establish the physical and chemical characteristics of these waters, new research observational, prospective, cross sectional type considered. From the agricultural perspective, by combining specific physical and chemical variables measured in the water is inference about the levels of exchangeable sodium in soils that are irrigated with this water, in addition to establishing the quantitative effects of ion concentrations in crops. The most important variables are: pH, EC, SAR, ESP and B. The values obtained, expressed in maximum and minimum are: 1. Cuenca del Oriental: pH = 9.7-7.2, EC = 13 258-79  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , SAR = 124.55-0.06, ESP = 67.79-0.06, B = 13.4-0.0 mg L<sup>-1</sup>; the maximum EC values belong to crater lakes and B to the Los Humeros caldera. 2. Sierra Norte: pH = 9.4-2.5, EC = 1913-61  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , SAR = 24.76-0.01, ESP = 29.50-0.01, B = 7.8-0.0 mg L<sup>-1</sup>; the minimum pH and maximum B values belong to the Acoculco caldera. Water quality and its use are defined by the partial and total ion concentrations. The waters are bicarbonates, thus altering the sodium content. The chemical nature of water is the main result of physical-chemical processes of water with the regional geology.

*Index words: RAS, PSI, crater lakes, Los Humeros, Acoculco.*

## **AGRADECIMIENTOS**

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

Al Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar, por la dirección de la investigación y sobre todo, por sus enseñanzas y gran amistad.

Al consejo particular: Dra. Norma Eugenia García Calderón, Dra. Amada Laura Reyes Ortigoza, Dr. Víctor A. González Hernández y Dr. David Flores Román, por sus exhaustivas revisiones y recomendaciones para mejorar la presentación escrita de esta investigación.

Al Dr. Carlos Ramírez Ayala, por su colaboración en esta investigación.

## CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN -----	1
2. TIPO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN -----	3
3. OBJETIVOS-----	3
3.1 Objetivos generales -----	3
4. HIPÓTESIS -----	4
5. REVISIÓN DE LITERATURA -----	5
5.1 Origen y tipo de sales solubles en suelos y aguas naturales -----	5
5.2 Procesos de acumulación de sales -----	6
5.3 Solubilidad de las sales en las soluciones acuosas -----	7
5.4 Calidad del agua para riego -----	8
5.5 Directrices sobre la calidad del agua -----	8
5.6 Evaluación del agua para riego con base en la concentración total de sales solubles -----	10
5.6.1 Evaluación del agua para riego con base en la salinidad efectiva -----	11
5.6.2 Evaluación del agua para riego con base en la salinidad potencial -----	12
5.7 Evaluación del agua para riego con base en el contenido de sodio-----	13
5.7.1 Ecuación para el cálculo del porcentaje de sodio intercambiable -----	15
5.7.2 Ecuación para el cálculo de la relación de adsorción de sodio original----	17
5.7.3 Ecuación para el cálculo de la relación de adsorción de sodio ajustada --	19
5.7.4 Ecuación para el cálculo de la relación de adsorción de sodio corregida -	21
5.7.5 Evaluación del agua para riego con base en el carbonato de sodio residual-----	23
5.7.6 Evaluación de los problemas de infiltración del agua para riego en el suelo-----	24
5.8 Evaluación del agua para riego con base en los elementos tóxicos para los cultivos -----	26
5.8.1 Evaluación del agua para riego con base en la presión osmótica -----	29
5.8.2 Evaluación del agua para riego con base en el contenido de boro -----	31
5.8.3 Evaluación del agua para riego con base en el contenido de fósforo-----	32

5.9 Clasificación hidrogeoquímica del agua -----	32
6. MATERIALES Y MÉTODOS -----	35
6.1 Ubicación y caracterización del área de estudio, y distribución espacio- temporal de las diferentes estaciones de muestreo -----	35
6.1.1 Cuenca del Oriental-----	35
6.1.1.1 Localización y límites.....	35
6.1.1.2 Marco geológico .....	36
6.1.1.2.1 Caldera Los Humeros .....	36
6.1.1.3 Hidrología .....	38
6.1.1.3.1 Lagos cráter .....	39
6.1.1.4 Clima .....	41
6.1.1.5 Suelos.....	41
6.1.1.6 Cultivos principales.....	41
6.1.2 Sierra Norte -----	42
6.1.2.1 Localización y límites.....	42
6.1.2.2 Marco geológico .....	42
6.1.2.2.1 Caldera de Acoculco .....	43
6.1.2.3 Hidrología .....	44
6.1.2.4 Clima .....	44
6.1.2.5 Suelos.....	45
6.1.2.6 Cultivos principales.....	45
6.2 Muestreo de aguas y suelos -----	45
6.3 Métodos analíticos para la determinación de los parámetros físico-químicos--	48
6.4 Determinación de bases intercambiables -----	51
6.5 Análisis estadístico (asociación de variables) -----	52
6.6 Evaluación de los datos analíticos-----	53
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN-----	55
7.1 Cuenca del Oriental -----	55
7.1.1 Composición iónica de las aguas -----	56
7.1.2 Distribución de los cationes y aniones en las aguas-----	57

7.1.3 Distribución de concentraciones: conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y concentración catiónica (en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) en las aguas -----	59
7.1.4 Relación entre las conductividades eléctricas determinadas experimentalmente y las determinadas teóricamente-----	61
7.1.5 Relación entre la concentración de sales ( $\text{mg L}^{-1}$ ) y la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )-----	63
7.1.6 Relación de la suma de cationes (en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con la conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) -----	64
7.1.7 Relación de la presión osmótica (en atm) con la conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) -----	65
7.1.8 Relación entre la concentración iónica ( $\text{mmol-ion L}^{-1}$ ) y la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) -----	68
7.1.9 Clasificación de las aguas que riegan los suelos de la Cuenca del Oriental, de acuerdo con la relación de adsorción de sodio (RAS)-----	70
7.1.10 Clasificación de las aguas de la Cuenca del Oriental en cuanto al peligro de la disminución de la infiltración -----	74
7.1.11 Carbonato de sodio residual (CSR) en las aguas de la Cuenca del Oriental-----	76
7.1.12 La relación funcional entre el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la relación de adsorción de sodio (RAS)-----	77
7.1.13 Distribución del boro en las aguas de la Cuenca del Oriental -----	80
7.1.14 Contenido de fósforo en las aguas de la Cuenca del Oriental-----	81
7.1.15 Contenido de nitrógeno en las aguas de la Cuenca del Oriental -----	82
7.2 Axalapazcos, maars o lagos cráter de la Cuenca del Oriental-----	84
7.2.1 Localización geográfica de los lagos cráter -----	84
7.2.2 Composición iónica de las aguas -----	87
7.2.3 Distribución de los cationes y aniones en las aguas-----	87
7.2.4 El sistema carbonato en las aguas de los lagos cráter -----	89
7.2.5 Composición de las sales hipotéticas de los lagos cráter -----	92
7.2.6 Distribución de concentraciones: conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y concentración catiónica (en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) en las aguas -----	95

7.2.7 Relación entre las conductividades eléctricas determinadas experimentalmente y las determinadas teóricamente-----	97
7.2.8 Relación entre la concentración de sales ( $\text{mg L}^{-1}$ ) y la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )-----	99
7.2.9 Relación de la suma de cationes (en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con la conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) -----	99
7.2.10 Relación de la presión osmótica (en atm) y la conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) -----	101
7.2.11 Relación entre la concentración iónica ( $\text{mmol-ion L}^{-1}$ ) y la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) -----	103
7.2.12 Clasificación de las aguas de los lagos cráter, de acuerdo con la relación de adsorción de sodio (RAS)-----	104
7.2.13 Clasificación de las aguas de los lagos cráter en cuanto al peligro de disminución de la infiltración -----	107
7.2.14 Carbonato de sodio residual (CSR) en las aguas de los lagos cráter ---	109
7.2.15 La relación funcional entre el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la relación de adsorción de sodio (RAS) en las aguas de los lagos cráter-----	111
7.2.16 Distribución del boro en las aguas de los lagos cráter -----	114
7.2.17 Contenido de fósforo en las aguas de los lagos cráter -----	116
7.2.18 Contenido de nitrógeno en las aguas de los lagos cráter-----	118
7.3 Acumulación de sales en las planicies lacustres de los ex-lagos de Totolcingo y Tepeyahualco en la Cuenca del Oriental -----	120
7.3.1 Sales solubles en la zona lacustre de Totolcingo-----	121
7.3.2 Sales solubles en la zona lacustre de Tepeyahualco -----	125
7.3.3 Bases intercambiables en la zona lacustre de Totolcingo-----	127
7.3.4 Bases intercambiables en la zona lacustre de Tepeyahualco-----	129
7.4 Sierra Norte -----	132
7.4.1 Caldera de Acoculco -----	133
7.4.2 Composición iónica de las aguas -----	137
7.4.3 Distribución de los cationes y aniones en las aguas-----	138

7.4.4 Distribución de concentraciones: conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y concentración catiónica (en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) en las aguas -----	139
7.4.5 Relación entre las conductividades eléctricas determinadas experimentalmente y las determinadas teóricamente-----	141
7.4.6 Relación entre la concentración de sales ( $\text{mg L}^{-1}$ ) y la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )-----	142
7.4.7 Relación de la suma de cationes (en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con la conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) -----	143
7.4.8 Relación de la presión osmótica (en atm) con la conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) -----	144
7.4.9 Relación entre la concentración iónica ( $\text{mmol-ion L}^{-1}$ ) y la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) -----	147
7.4.10 Clasificación de las aguas de la Sierra Norte, de acuerdo con la relación de adsorción de sodio (RAS)-----	148
7.4.11 Clasificación de las aguas de la Sierra Norte en cuanto al peligro de la disminución de la infiltración-----	151
7.4.12 Carbonato de sodio residual (CSR) en las aguas de la Sierra Norte ----	152
7.4.13 La relación funcional entre el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la relación de adsorción de sodio (RAS) en las aguas de la Sierra Norte-----	154
7.4.14 Distribución del boro en las aguas de la Sierra Norte -----	156
7.4.15 Contenido de fósforo en las aguas de la Sierra Norte -----	157
7.4.16 Contenido de nitrógeno en las aguas de la Sierra Norte-----	158
8. CONCLUSIONES -----	160
8.1 Cuenca del Oriental -----	160
8.1.1 Lagos cráter-----	161
8.1.2 Suelos de las llanuras ex-lacustres de Totolcingo y de Tepeyahualco ---	161
8.2 Sierra Norte -----	161
9. RECOMENDACIONES -----	162
10. LITERATURA CITADA -----	163
11. ANEXOS -----	172

Anexo A. Cuenca del Oriental -----	172
Anexo B. Lagos cráter de la Cuenca del Oriental -----	181
Anexo C. Suelos de la Cuenca del Oriental-----	188
Anexo D. Sierra Norte-----	199
12. GLOSARIO -----	208

## ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Clasificación del agua para riego de acuerdo a la salinidad efectiva.....	12
Cuadro 2. Clasificación del agua para riego de acuerdo a la salinidad potencial.....	13
Cuadro 3. Concentración de $\text{Ca}^0$ 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> .....	22
Cuadro 4. Clasificación del agua para riego de acuerdo con el CSR.....	24
Cuadro 5. Efecto de soluciones isoosmóticas de NaCl y manitol sobre el crecimiento de raíces aisladas de alfalfa.....	27
Cuadro 6. Límites permisibles de boro en $\text{mg L}^{-1}$ , establecidos por Wilcox en 1948, para diferentes clases de aguas de riego.....	32
Cuadro 7. Marchas analíticas utilizadas para las determinaciones físico-químicas en aguas y suelos de la Cuenca del Oriental y Sierra Norte. Estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. ....	49
Cuadro 8. Directrices para interpretar la calidad de las aguas para riego.....	50
Cuadro 9. Criterio de aceptación del balance anión-cation.....	53
Cuadro 10. Factores de conductividad para iones comúnmente encontrados en el agua.....	54
Cuadro 11. Síntesis de clasificación de las aguas de la Cuenca del Oriental con base en el diagrama de Richards. Estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008. ....	74
Cuadro 12. Localización de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. ....	85
Cuadro 13. Características principales de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. ....	86
Cuadro 14. Composición de las sales hipotéticas (en toneladas de sal) de los aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. ....	95

Cuadro 15. Síntesis de clasificación de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental con base en el diagrama de Richards. Estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008. ....	107
Cuadro 16. Composición química de los gases fumarólicos del volcán Showa en Japón.....	114
Cuadro 17. Síntesis de la clasificación de las aguas de la Sierra Norte con base en el diagrama de Richards. Estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.....	151
Cuadro 18. Abundancia del nitrógeno en la biosfera.....	159

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio. (Fuente: Oster y Schroer, 1979). ....	25
Figura 2. Sistema de clasificación hidrogeoquímica de aguas naturales usando el diagrama trilineal de Piper. ....	33
Figura 3. Ubicación de los puntos de muestreo de aguas en la Cuenca del Oriental y en la Sierra Norte. Estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. ....	47
Figura 4. Ubicación de los puntos de muestreo de suelos en la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. ....	48
Figura 5. Diagrama de distribución iónica en las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008. ....	58
Figura 6. Distribución de frecuencias de los valores de la conductividad eléctrica de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008. ....	59
Figura 7. Distribución de frecuencias de los valores de la concentración de cationes de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008. ....	60
Figura 8. Relación funcional entre la conductividad eléctrica teórica y la experimental, en $\mu\text{S cm}^{-1}$ , de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008. ....	62
Figura 9. Concentración de sales expresadas en $\text{mg L}^{-1}$ y su relación con la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008. ....	64
Figura 10. Relación de la suma de cationes en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ con la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008. ....	65

Figura 11. Relación entre la $\pi_{\text{Teórica}}$ en atm y la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008. ....	67
Figura 12. Relación entre la $\pi_{\text{Teórica}}$ y la $\pi_{\text{Experimental}}$ en atm de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.....	68
Figura 13. Relación entre los mmol-ion $\text{L}^{-1}$ y la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008. ....	69
Figura 14. Relación entre los valores de la RAS ajustada y la RAS original de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008. ....	72
Figura 15. Relación entre los valores de la RAS corregida y la RAS original de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008. ....	72
Figura 16. Clasificación de las aguas de la Cuenca del Oriental mediante el diagrama de Richards (1990). Estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008. ....	73
Figura 17. Clasificación de las aguas de la Cuenca del Oriental mediante el diagrama de Ayers y Westcot (1987). Estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008. ....	75
Figura 18. Contenido de carbonato de sodio residual en las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.....	76
Figura 19. Relación funcional PSI-RAS con base en las distintas formulaciones de la RAS y valores de K, de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.....	79
Figura 20. Evaluación del contenido de boro en las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.....	81

Figura 21. Evaluación del contenido de fósforo en las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.....	82
Figura 22. Evaluación del contenido de nitrógeno en las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Otoño 2008. ....	83
Figura 23. Diagrama de distribución iónica de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.....	89
Figura 24. Concentración iónica en porcentaje de $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera 2008. ....	93
Figura 25. Concentración iónica en porcentaje de $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Otoño 2008. ....	94
Figura 26. Distribución de frecuencias de los valores de la conductividad eléctrica de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.....	96
Figura 27. Distribución de frecuencias de los valores de la concentración de cationes de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.....	97
Figura 28. Relación funcional entre la conductividad eléctrica teórica y la experimental, en $\mu\text{S cm}^{-1}$ , de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.....	98
Figura 29. Concentración de sales expresadas en $\text{mg L}^{-1}$ y su relación con la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.....	99
Figura 30. Relación de la suma de cationes en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ con la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca	

del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.....	100
Figura 31. Relación entre la $\pi_{\text{Teórica}}$ y la $\pi_{\text{Experimental}}$ en atm de las muestras de agua de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008. ....	102
Figura 32. Relación entre la $\pi_{\text{Teórica}}$ en atm y la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.....	102
Figura 33. Relación entre los $\text{mmol-ion L}^{-1}$ y la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.....	103
Figura 34. Relación entre los valores de la RAS ajustada y la RAS original de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008. ....	105
Figura 35. Relación entre los valores de la RAS corregida y la RAS original de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008. ....	105
Figura 36. Clasificación de las aguas, mediante el diagrama de Richards, de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008. ....	106
Figura 37. Clasificación de las aguas, mediante el diagrama de Ayers y Westcot, de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008. ....	108
Figura 38. Evaluación del carbonato de sodio residual en las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008. ....	110
Figura 39. Relación funcional PSI-RAS con base en las distintas formulaciones de la RAS y valores de K de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.....	113

Figura 40. Evaluación del contenido de boro en las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.....	116
Figura 41. Evaluación del contenido de fósforo en las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.....	118
Figura 42. Evaluación del contenido de nitrógeno en las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Otoño 2008.....	119
Figura 43. Distribución de sales solubles. Perfil 1, Laguna Totolcingo. a) Saturación; b) Relación 1:5. ....	122
Figura 44. Distribución de sales solubles. Perfil 3, Laguna Totolcingo. a) Saturación; b) Relación 1:5. ....	123
Figura 45. Distribución de sales solubles. Perfil 4, Laguna Totolcingo. a) Saturación; b) Relación 1:5. ....	124
Figura 46. Distribución de sales solubles. Perfil 5, Laguna Totolcingo. a) Saturación; b) Relación 1:5. ....	124
Figura 47. Distribución de sales solubles. Perfil 2, Laguna Tepeyahualco. a) Saturación; b) Relación 1:5. ....	125
Figura 48. Distribución de sales solubles. Perfil 6, área de riego Laguna Tepeyahualco. a) Saturación; b) Relación 1:5.....	126
Figura 49. Distribución de bases intercambiables. Perfil 1, Laguna Totolcingo.....	127
Figura 50. Distribución de bases intercambiables. Perfil 3, Laguna Totolcingo.....	128
Figura 51. Distribución de bases intercambiables. Perfil 4, Laguna Totolcingo.....	128
Figura 52. Distribución de bases intercambiables. Perfil 5, Laguna Totolcingo.....	129
Figura 53. Distribución de bases intercambiables, calculadas de la relación 1:5. Perfil 2, Laguna Tepeyahualco. ....	130
Figura 54. Distribución de bases intercambiables. Perfil 6, área de riego Laguna Tepeyahualco. ....	131

Figura 55. Modelo geológico esquemático del complejo caldera de Tulancingo-Acocolco y su sistema de desarrollo geotérmico con base en datos geológicos, gravimétricos y magnéticos. ....	134
Figura 56. Diagrama de distribución iónica en las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.....	138
Figura 57. Distribución de frecuencias de los valores de la conductividad eléctrica de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.....	139
Figura 58. Distribución de frecuencias de los valores de la concentración de cationes de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.....	140
Figura 59. Relación funcional entre la conductividad eléctrica teórica y la experimental, en $\mu\text{S cm}^{-1}$ , de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.....	142
Figura 60. Concentración de sales expresadas en $\text{mg L}^{-1}$ y su relación con la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.....	143
Figura 61. Relación de la suma de cationes en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ de las sales solubles con respecto a la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.....	144
Figura 62. Relación entre la $\pi_{\text{Teórica}}$ en atm y la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.....	146
Figura 63. Relación entre la $\pi_{\text{Teórica}}$ y la $\pi_{\text{Experimental}}$ en atm de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.....	147
Figura 64. Relación entre los $\text{mmol-ion L}^{-1}$ y la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.....	148

Figura 65. Relación entre los valores de la RAS ajustada y la RAS original de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.....	149
Figura 66. Relación entre los valores de la RAS corregida y la RAS original de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.....	149
Figura 67. Clasificación de las aguas mediante el diagrama de Richards de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.....	150
Figura 68. Clasificación de las aguas de la Sierra Norte mediante el diagrama de Ayers y Westcot. Estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.....	152
Figura 69. Evaluación del carbonato de sodio residual de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.....	153
Figura 70. Relación funcional PSI-RAS con base en las distintas formulaciones de la RAS y valores de K de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008. ....	155
Figura 71. Evaluación del contenido de boro de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.....	157
Figura 72. Evaluación del contenido de fósforo de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.....	158
Figura 73. Evaluación del contenido de nitrógeno en las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Otoño 2008. ....	159

## 1. INTRODUCCIÓN

En el estado de Puebla el agua subterránea es de gran importancia económica, ya que condiciona fuertemente la posibilidad de incrementar su desarrollo económico. El 80% del agua subterránea extraída se emplea principalmente en la agricultura. La mayor proporción del agua subterránea disponible se encuentra en la Cuenca del Oriental (INEGI, 2010). La extracción en la cuenca se ha incrementado en los últimos años debido a la incorporación de áreas nuevas a la agricultura de riego.

Los límites de la Cuenca del Oriental cuentan con las siguientes elevaciones: El Pico de Orizaba con 5675 m, el volcán de La Malinche con una elevación de 4461 m y el Cofre de Perote con una elevación de 4128 m. En el centro de la cuenca se localiza la laguna de Totolcingo, a 2334 m. En la cuenca también se cuenta con una zona de embalses intermitentes ubicados en la laguna de Tepeyahualco a una altitud de 2312 m.

En la laguna de Totolcingo ha ido disminuyendo la superficie ocupada con agua con el tiempo; en cambio, en la laguna de Tepeyahualco ubicada al pie del Cerro Pizarro, hay periodos de intermitencia de llegada de agua más prolongados. Los rellenos de la planicie lacustre de Totolcingo son de predominancia basáltica debido a las explosiones de cenizas basálticas de La Malinche. Los materiales de relleno de la planicie de Tepeyahualco son riolíticos y basálticos, y con influencia de otros materiales derivados de las explosiones de la caldera de Los Humeros.

En este estudio de las aguas superficiales y subterráneas de la Cuenca del Oriental se incluyeron las aguas de niveles freáticos de las estribaciones de las zonas lacustres de Totolcingo y Tepeyahualco, y también se incluyeron las aguas de los lagos cráter (maars) de Alchichica, La Preciosa, Quechulac, Atexcac, Aljojuca y Tecuitlapa.

También se caracterizaron las aguas superficiales y subterráneas de la Sierra Norte de Puebla. A los cauces de las aguas de los ríos superficiales se vierten aguas residuales de los distintos poblados que se encuentran en esta zona. Como caso particular de esta región, se estudiaron las aguas de la Caldera de Acoculco en la región de La Alcaparroza.

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

Como índice particular de especial importancia, en lo que se refiere a la evaluación de la calidad de las aguas que se utilizan en el riego de cultivos agrícolas, se determinaron los valores de la relación de adsorción de sodio en sus diferentes conceptualizaciones ( $RAS$ ,  $RAS_{aj}$  y  $RAS^0$ ), ya que este índice incide directamente en las propiedades físico-químicas de los suelos. Además, en estas aguas se determinaron los contenidos de boro, ortofosfatos y nitratos. Los ortofosfatos y los nitratos causan diferentes niveles de intensidad de desarrollo en los procesos de eutrofización.

Por último, en los perfiles de los suelos de las planicies de las lagunas de Totolcingo y de Tepeyahualco se determinaron las sales solubles y el sodio intercambiable por el método de Pfeffer.

## 2. TIPO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo de investigación es observacional, prospectivo, transversal y descriptivo.

## 3. OBJETIVOS

### 3.1 Objetivos generales

Para poder establecer las características físico-químicas de las aguas superficiales y subterráneas, que incluyen los lagos-cráter (maars), de la Cuenca del Oriental, y de la Sierra Norte del estado de Puebla, se procedió a determinar los siguientes parámetros:

1. Composición iónica de las diferentes muestras de agua ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , pH, CE,  $\pi$ ,  $\text{mg L}^{-1}$ ,  $\text{PO}_4$ , B y  $\text{NO}_3^-$ ).
2. Determinación de la relación de adsorción de sodio (RAS), en sus diferentes conceptualizaciones: RAS original (RAS), RAS ajustada ( $\text{RAS}_{aj}$ ) y RAS corregida ( $\text{RAS}^0$ ), así como los valores de  $\text{RAS}_{\min}$  y  $\text{RAS}_{\max}$ . Con estos valores se infiere sobre los diferentes niveles de sodio intercambiable en los suelos (XNa).
3. Para obtener los valores límite de  $\text{PSI}_{\min}$ - $\text{PSI}_{\max}$  se utilizaron varias expresiones numéricas del coeficiente de selectividad iónica de Gapon.
4. Evaluación experimental de las distintas cantidades de sodio intercambiable en los suelos con el método de Pfeffer, en varios puntos de las zonas lacustres de Totolcingo y Tepeyahualco.

#### **4. HIPÓTESIS**

Con las mediciones de las diferentes variables físico-químicas de las aguas superficiales y subterráneas de la Cuenca del Oriental y de la Sierra Norte de Puebla, mediante la asociación de variables específicas se puede inferir sobre los niveles de sodio intercambiable en los suelos de estas zonas que son regados con estas aguas y además establecer efectos cuantitativos de las concentraciones totales de estas aguas en los cultivos agrícolas.

## 5. REVISIÓN DE LITERATURA

### 5.1 Origen y tipo de sales solubles en suelos y aguas naturales

Los elementos contenidos en el suelo y el agua, son el resultado de procesos de intemperismo químico (hidrólisis, hidratación, solución, oxidación y carbonatación) de las rocas al contacto con el agua (Lesser, 1987; Richards, 1990). Posteriormente ocurre la formación y acumulación de estos elementos en forma de sales en los suelos, como resultado de muchos procesos geoquímicos que suceden en las capas superficiales de la corteza terrestre (Lesser *et al.*, 1986). Kovda *et al.* (1973) consideran que “la fuente fundamental de todos los tipos actuales de acumulaciones salinas son los procesos de intemperismo de las rocas cristalinas y que forman a los carbonatos, sulfatos, cloruros y boratos”. Las sales más importantes que se forman en suelos y aguas son:

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

Las 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).

## 5.2 Procesos de acumulación de sales

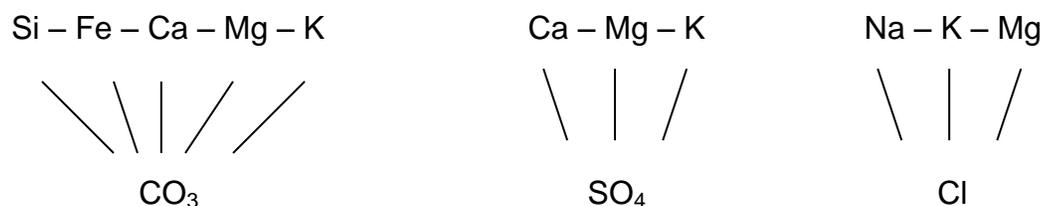
En los procesos de formación de suelos salinos es necesario distinguir los diferentes ciclos de acumulación de sales, los cuales de acuerdo a Kovda (1961) pueden ser:

- a) Continentales. Están relacionados con el movimiento, redistribución y acumulación de sales de los ácidos: carbónico, sulfúrico y clorhídrico en las regiones intracontinentales sin escurrimiento. Por ejemplo: la Cuenca de México y El Carmen o Cuenca del Oriental.
- b) Limítrofes a los mares. Se relacionan con la acumulación de sales marinas, fundamentalmente de los cloruros de sodio, en las zonas bajas que limitan con el mar y en las orillas de pequeños golfos someros.
- c) Deltáicos. Están ampliamente distribuidos y son de gran importancia para el hombre debido a que las superficies de los deltas de los ríos, desde tiempos antiguos, han sido ampliamente utilizados para la agricultura. Por ejemplo: delta del Guapo, Laguna Tacarigua, Venezuela (Calzadilla, 2002 y 2003).
- d) Artesianos. Se deben a la evaporación de aguas subterráneas interestratificadas y debido a subpresión se elevan a la superficie a través de grietas tectónicas y estructuras destruidas. Por lo general estas aguas son ricas en  $\text{HCO}_3$  y  $\text{SiO}_2$ . En México, un ejemplo de salinización de los suelos debido a los procesos de subpresión, se encuentra en el municipio de El Salvador, Valle de Mezquital, Edo. de Hidalgo.
- e) Antropogénicos. Son debidos a los errores que comete el hombre durante su actividad productiva por no conocer las leyes y regularidades de las acumulaciones salinas.

Los procesos de acumulación de sales están asociados con las condiciones climáticas, geomorfológicas, micromorfológicas, hidrogeológicas y biológicas de cada región. Lo referente a condiciones climáticas influye principalmente en aquellas regiones que poseen clima seco y altas temperaturas, donde la evaporación durante todo el año o en algunas estaciones, supera a la precipitación. Por esto, en las regiones áridas o semiáridas se encuentra una gran cantidad de suelos salinos. Los aspectos orográficos también tienen importancia en la formación de suelos salinos ya que en las depresiones con drenaje restringido y rodeadas por cadenas montañosas, el agua que escurre desde las partes altas hacia las partes bajas lleva consigo sales disueltas que son depositadas en las partes más bajas (Kovda *et al.*, 1973).

### 5.3 Solubilidad de las sales en las soluciones acuosas

Las sales solubles que se encuentran en la capa intempérica del suelo y en las aguas freáticas superficiales son: las sales del ácido clorhídrico, del ácido sulfúrico y las del ácido carbónico. En las rocas sedimentarias, capa del intemperismo y suelos, una gran parte de las sales se encuentra en forma cristalina y durante el humedecimiento, una parte de ellas pasa a la fase líquida y a medida que aumenta la temperatura, la solubilidad de algunas sales incrementa ( $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). La secuencia de la precipitación de las sales de una solución policomponente, depende del grado de su solubilidad. Una regularidad general de precipitación se expresa de la siguiente manera:



Las regularidades de la precipitación de las sales se han estudiado ampliamente en las aguas de altos contenidos salinos. En primer lugar se precipitan los hidróxidos de silicio y fierro, después los carbonatos de calcio y magnesio, más adelante el yeso y

los sulfatos de magnesio, y por último los cloruros de sodio, potasio y magnesio (Szabolcs, 1989).

#### 5.4 Calidad del agua para riego

El concepto de calidad del agua se refiere a la característica de las aguas que pueden afectar su adaptabilidad a un uso específico y se define por sus características físicas, químicas o biológicas (Ayers y Westcot, 1987). En aguas para uso agrícola, la calidad es definida por la concentración de iones específicos,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  como cationes;  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  como aniones, y otros de menor proporción como el  $\text{B}^{3+}$ ,  $\text{I}^-$  y  $\text{NO}_3^-$  (Pizarro, 1985). Es decir, la calidad del agua para riego está determinada por la concentración y composición de los constituyentes disueltos que contenga (Richards, 1990). Estos elementos tienen su origen en la disolución o meteorización de las rocas y suelos. Son transportadas mediante corrientes tanto superficiales como subterráneas y depositadas en el suelo de forma natural o mediante el riego (Lesser, 1987).

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

#### 5.5 Directrices sobre la calidad del agua

Para prever un problema relacionado con la calidad del agua, para riego, hay que evaluar las posibilidades de que el agua afecte las propiedades de los suelos y el rendimiento de los cultivos, y evaluar la necesidad de emplear técnicas de manejo especiales para mantener las condiciones aceptables. Existen varios procedimientos para realizar esta evaluación, pero independientemente del método que se use y debido a que estos problemas deben resolverse a nivel de parcela, la evaluación

debe hacerse teniendo en cuenta las condiciones locales específicas y la capacidad de manejo del usuario.

Las directrices se refieren sobre todo a los efectos a largo plazo de la calidad del agua sobre la producción de cultivos, las condiciones del suelo y el manejo agrícola. Estas tienen carácter práctico y han sido utilizadas con éxito en la agricultura bajo riego para evaluar los componentes del agua superficial, agua subterránea, agua de drenaje, efluentes de desagües y otras aguas residuales.

Cuando se utilizan aguas con valores menores a los correspondientes a “ninguna” restricción de uso, por lo general, no se presentan o no se identifican problemas en los cultivos o en el suelo. En el caso de restricción “ligera a moderada” se requiere un cuidado gradualmente mayor en la selección de los cultivos y de las alternativas de manejo para alcanzar el potencial máximo de rendimiento. La restricción “severa” implica la aparición de problemas en el suelo y el cultivo o reducción de los rendimientos, y la necesidad de contar con un manejo hábil y efectivo para lograr rendimientos aceptables, además de un plan de operación específicamente adaptado a la calidad del agua que ha de emplearse. Los límites presentados son en cierto modo arbitrarios ya que en la realidad los cambios son graduales y no existe una división abrupta sobre las diferentes graduaciones. Una variación del 10 al 20%, por encima o por debajo de los datos, tiene poca importancia, si se considera juntamente y en relación con otros factores que puedan afectar los rendimientos.

Richards (1990) establece que las características más importantes que determinan la calidad del agua para riego son: 1. La concentración total de sales solubles; 2. La concentración relativa del sodio con respecto a otros cationes; 3. La concentración de boro u otros elementos que puedan ser tóxicos; y 4. Bajo ciertas condiciones, la concentración de bicarbonatos con relación a la concentración de calcio más magnesio.

## 5.6 Evaluación del agua para riego con base en la concentración total de sales solubles

Las aguas de riego tienen un contenido mayor o menor de sales solubles de origen natural (Pizarro, 1985). Consecuentemente, los suelos regados con esas aguas contienen una mezcla similar, pero generalmente de mayor concentración (Ayers y Westcot, 1987). El proceso principal de la salinización de los suelos es mediante la aplicación del agua de riego cuando no es manejada correctamente de acuerdo a su calidad (Pizarro, 1985).

La mayoría de las aguas, consideradas peligrosas, tienen un contenido relativo de sales que en sí mismos no es demasiado perjudicial; el problema se presenta cuando esas aguas interactúan con la concentración salina del suelo. La evaporación y transpiración consumen grandes cantidades de agua disminuyendo la humedad del suelo, pero no afecta a las sales disueltas, de forma que la solución del suelo se hace más salina a medida que el suelo se seca. Por esta razón un agua que inicialmente tuviera una concentración salina aceptable puede alcanzar valores elevados en el suelo. Pero además, se presentan otros fenómenos al concentrarse las sales, por ejemplo, algunas de ellas puede alcanzar su límite de solubilidad y precipitar, retirando de la solución del suelo determinados cationes y alterando las proporciones iniciales (Miyamoto y Pingitore, 1992). Esto suele ocurrir con algunas sales de calcio de baja solubilidad ( $\text{CaCO}_3$  y  $\text{CaSO}_4$ ), comúnmente usados para la rehabilitación de suelos salinos; lo que tiene como consecuencia un aumento en la proporción de sodio en la solución del suelo y del porcentaje de sodio intercambiable (Ayers y Westcot, 1987).

El personal de salinidad de los Estados Unidos, han establecido las exigencias de calidad para las aguas de riego a fin de prevenir la salinización de los suelos (Richards, 1990). La concentración total de sales solubles en las aguas de riego, para fines de diagnóstico y clasificación, se puede expresar en términos de conductividad eléctrica y se dividen en 4 clases:

Agua de salinidad baja (C1): puede usarse para el riego de la mayor parte de los cultivos, en casi cualquier tipo de suelo con muy poca probabilidad de que se desarrolle salinidad. Se necesita algún lavado, pero este se logra en condiciones normales de riego, excepto en suelos de muy baja permeabilidad.

Agua de salinidad media (C2): puede usarse siempre y cuando haya un grado moderado de lavado. En casi todos los casos y sin necesidad de prácticas especiales de control de salinidad, pueden crecer en estas condiciones plantas que son moderadamente tolerantes a las sales.

Agua de salinidad alta (C3): No puede usarse en suelos cuyo drenaje sea deficiente. Aún con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales de control de la salinidad, debiendo por lo tanto, seleccionar únicamente aquellas especies vegetales muy tolerantes a las sales.

Agua de salinidad muy alta (C4): no es apropiada para riego bajo condiciones ordinarias, pero puede 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; en este caso, se deben seleccionar cultivos altamente tolerantes a las sales.

#### 5.6.1 Evaluación del agua para riego con base en la salinidad efectiva

Otra forma de evaluar la calidad del agua, con base a la salinidad, es mediante el índice de salinidad efectiva (Cuadro 1). Este índice hace una estimación más real del peligro que presentan las sales solubles del agua de riego al pasar a formar parte de la solución del suelo, pues toma en cuenta la precipitación de las sales menos solubles: carbonatos de calcio y magnesio, y sulfato de calcio, los que, por consiguiente, dejan de participar en el incremento de la presión osmótica de la solución del suelo. El valor de la salinidad efectiva indica la cantidad de sales que quedarán en solución y serán las potencialmente nocivas para los cultivos. Este

proceso es más notable cuando las aguas tienen un contenido alto de carbonatos y bicarbonatos. La salinidad efectiva (SE) se calcula con alguna de las siguientes fórmulas:

1) si  $Ca > CO_3 + HCO_3 + SO_4$ , entonces:

$$SE = \text{Suma de cationes}^* - (CO_3 + HCO_3 + SO_4)$$

2) si  $Ca < CO_3 + HCO_3 + SO_4$ ; pero  $Ca > CO_3 + HCO_3$ ; entonces:

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

3) si  $Ca < CO_3 + HCO_3$ ; pero  $Ca + Mg > CO_3 + HCO_3$ ; entonces:

$$SE = \text{Suma de cationes}^* - (CO_3 + HCO_3)$$

4)  $Ca + Mg < CO_3 + HCO_3$ ; entonces:

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

\* Se usa la suma mayor de aniones o cationes.

Todos los iones se expresan en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ .

Cuadro 1. Clasificación del agua para riego de acuerdo a la salinidad efectiva.

Características del suelo	SE	Muy buena-buena	Buena-peligrosa	Peligrosa-muy peligrosa
Poca o ninguna lixiviación	$\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$	< 3	3-5	> 5
(suelos arcillosos)	$\text{mg L}^{-1}$	< 165	165-275	> 275
Baja lixiviación, drenaje restringido (suelos limosos)	$\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$	< 5	5-10	> 10
Buen drenaje (suelos arenosos)	$\text{mg L}^{-1}$	< 275	275-550	> 550
	$\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$	< 7	7-15	> 15
	$\text{mg L}^{-1}$	< 385	385-825	> 825

Fuente: Doneen, 1958.

#### 5.6.2 Evaluación del agua para riego con base en la salinidad potencial

Cuando la humedad aprovechable del suelo disminuye a niveles inferiores del 50 por ciento, las últimas sales que quedan en solución son los cloruros y parte de los

sulfatos. La salinidad potencial (SP) es un índice para estimar el peligro de estas últimas sales que quedan en solución, a bajos niveles de humedad y que, por consiguiente, aumentan considerablemente la presión osmótica. Por la razón anterior, la salinidad potencial es uno de los mejores estimadores del efecto de las sales sobre las plantas. Los valores de clasificación se citan en el Cuadro 2. Este índice se calcula con la siguiente fórmula:

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

Donde todos los conceptos se expresan en  $mmol_c L^{-1}$ .

Cuadro 2. Clasificación del agua para riego de acuerdo a la salinidad potencial.

Clase de agua	Salinidad potencial $mmol_c L^{-1}$
Buena	< 3.0
Condicionada	3.0 – 15.0
No recomendable	> 15.0

Esta clasificación propuesta por Doneen en 1959, citado por Frenkel (1984), incluye sólo las sales NaCl y Mg-Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Los iones Ca<sup>2+</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> no se incluyen en la salinidad potencial porque se asume que estos se han removido de la solución del suelo mediante su precipitación como CaCO<sub>3</sub> o CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O.

### 5.7 Evaluación del agua para riego con base en el contenido de sodio

Con respecto al contenido de sodio en las aguas de riego, las aguas se clasifican utilizando la relación de adsorción de sodio (RAS) con respecto a la concentración iónica (CE), mediante el diagrama propuesto por Richards (1990); esta clasificación se basa principalmente en el efecto que tiene el ion sodio adsorbido, sobre las condiciones físicas del suelo, es decir, se predice el efecto del sodio del agua de riego, que pasará a formar parte del suelo.

Cuando se tienen altos valores de sodio intercambiable en los suelos, en estos se presentan disminuciones en la permeabilidad, alteraciones en el medio poroso y efectos tóxicos en plantas sensibles al ion sodio. Los problemas de permeabilidad y alteraciones en el medio poroso, se hacen evidentes cuando se presenta una disminución en la velocidad de infiltración del agua de riego y los problemas de toxicidad se manifiestan, generalmente, mediante coloraciones cafés y caída simultánea de las hojas. Con base al contenido de sodio (RAS) las aguas para riego se clasifican en 4 clases:

Agua baja en sodio (S1): puede usarse para el riego en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. No obstante, los cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

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

Agua alta en sodio (S3): puede producir niveles tóxicos de sodio intercambiable en la mayor parte de los suelos, por lo que estos necesitarán prácticas especiales de manejo, buen drenaje, fácil lavado y adiciones de materia orgánica. Los suelos yesíferos pueden no desarrollar niveles perjudiciales de sodio intercambiable cuando se riegan con este tipo de aguas. Puede requerirse el uso de mejoradores químicos para substituir al sodio intercambiable; sin embargo, tales mejoradores no serán económicos si se usan aguas de salinidad muy alta.

Agua muy alta en sodio (S4): es inadecuada para riego, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio del suelo y la aplicación de yeso u otros mejoradores no hace antieconómico el empleo de esta clase de aguas.

### 5.7.1 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:

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

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.

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

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

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:

$$\text{PSI} = 1.95 + 1.03 \text{ SAR}$$

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 una 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 migajón-arenoso-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  $K (\text{mmol L}^{-1})^{-1/2}$ , 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 ( $\text{PSI}_{\text{max}}-\text{PSI}_{\text{min}}$ ). La estimación del RAS bajo diferentes conceptualizaciones prevé las variaciones de las concentraciones de los iones de  $\text{Ca}^{2+}$ . 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 ( $\text{Ca}^{2+}$ ) para restablecer las propiedades físico-químicas de los suelos.

#### 5.7.2 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 una 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:

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

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

Esta formulación de RAS no contempla las diferencias físico-químicas esenciales de los iones polivalentes de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . El radio iónico del  $\text{Na}^+$  es de 0.098, el del  $\text{Ca}^{2+}$  es de 0.104 y el del  $\text{Mg}^{2+}$  es de 0.074 nm. Los números de hidratación en moles de  $\text{H}_2\text{O}$ /mol de electrolitos son: para el ión  $\text{Na}^+$  = 16.2, para el  $\text{Ca}^{2+}$  = 16.7 y para el  $\text{Mg}^{2+}$  = 18.9. De aquí se deriva que los procesos de hidrólisis de estos iones se manifiestan con diferente intensidad. Esta es la razón por la que el valor de la RAS sufre variaciones debido a la dilución, es decir, cuando la solución se diluye su RAS disminuye. Esta formulación supone que el Ca y el Mg tienen la misma selectividad de intercambio, que no es correcto; para un mismo RAS, la adsorción de Na crece al aumentar la relación Mg/Ca debido a la menor energía de enlace del Mg. Por otra parte, no se consideran las variaciones de las concentraciones del ión  $\text{Ca}^{2+}$  debido a su precipitación en condiciones de alcalinidad elevada,  $\text{pH} > 8.2$ . Precipitación que se presenta para el Ca en forma de  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{CaSO}_4$ .

### 5.7.3 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 ( $RAS_{aj}$ ).

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

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 ( $pH_a$ ) establecido como 8.4 y el pH teórico que el agua alcanzaría en equilibrio con el  $CaCO_3$  ( $pH_c$ ).

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  $CO_2$ ) precipitando o diluyendo  $CaCO_3$ . El índice de saturación se calcula como sigue:

$$IS = (8.4 - pH_c)$$

Valores positivos de este índice indican que el  $CaCO_3$  precipitará del agua, mientras que valores negativos indican que el agua solubilizará  $CaCO_3$ . La ecuación de Langelier para el cálculo del  $pH_c$  es:

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

En donde:

$pK_2'$  = Es el logaritmo negativo de la segunda constante de disociación del ácido carbónico ( $H_2CO_3$ ), corregido por la fuerza iónica.

$pK_c'$  = Es el producto de solubilidad del  $CaCO_3$ , 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  $CO_3$  y  $HCO_3$ .

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

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

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

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

Donde C es la concentración total de cationes en  $mmol_c L^{-1}$ .

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

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

En 1981, Suárez recomienda un nuevo procedimiento para el cálculo de la relación de adsorción de sodio, la RAS corregida ( $RAS^{\circ}$ ); que conjuntamente con el valor de  $Ca^{\circ}$  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 ( $CO_2$ ), del ión bicarbonato ( $HCO_3^-$ ) y de la salinidad, sobre el calcio originalmente contenido en el agua de riego y que no forma parte de la solución del suelo. Este procedimiento supone la existencia de una fuente de calcio en el suelo, como la caliza ( $CaCO_3$ ) u otros minerales como los silicatos y la inexistencia de precipitación del magnesio. La  $RAS^{\circ}$  puede calcularse mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

Na = Contenido de sodio en el agua de riego,  $mmol_c L^{-1}$

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

Mg = Contenido de magnesio en el agua de riego,  $mmol_c L^{-1}$

El valor de  $Ca^{\circ}$  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 ( $HCO_3^-/Ca^{2+}$ ) y por la presión parcial del dióxido de carbono ( $CO_2$ ) ejercida en los primeros milímetros del suelo ( $P = 0.0007 \text{ atm}$ ). Cada uno de los valores del Cuadro 3, 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. Concentración de  $\text{Ca}^0$  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
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	9.57	7.91
0.25	4.51	4.65	4.76	4.92	5.06	5.22	5.44	5.62	5.91	6.15	6.52	6.82
0.30	4.00	4.12	4.21	4.36	4.48	4.62	4.82	4.98	5.24	5.44	5.77	6.04
0.35	3.61	3.72	3.80	3.94	4.04	4.17	4.35	4.49	4.72	4.91	5.21	5.45
0.40	3.30	3.40	3.48	3.60	3.70	3.82	3.98	4.11	4.32	4.49	4.77	4.98
0.45	3.05	3.14	3.22	3.33	3.42	3.53	3.68	3.80	4.00	4.15	4.41	4.61
0.50	2.84	2.93	3.00	3.10	3.19	3.29	3.43	3.54	3.72	3.87	4.11	4.30
0.75	2.17	2.24	2.29	2.37	2.43	2.51	2.62	2.70	2.84	2.95	3.14	3.28
1.00	1.79	1.85	1.89	1.96	2.01	2.09	2.16	2.23	2.35	2.44	2.59	2.71
Valor de $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )												
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. 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.  $\text{Ca}^0$  y  $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$  están expresadas en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>.

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

Otra de las consideraciones que Richards (1990) recomienda al evaluar es la concentración de bicarbonatos con relación a la concentración de calcio más magnesio. En aguas ricas con iones bicarbonato existe la tendencia del calcio y del magnesio a precipitarse en forma de carbonatos, a medida que la solución del suelo se vuelve más concentrada. Esta reacción no se completa totalmente en circunstancias ordinarias, pero a medida que va teniendo lugar, las concentraciones de calcio y magnesio se van reduciendo, aumentando así la proporción relativa del sodio. Eaton (1950) usa el término carbonato de sodio residual (CSR) al referirse a esta reacción.

Cuando en el agua de riego el contenido de carbonatos y bicarbonatos es mayor que el contenido de calcio y magnesio, existe la posibilidad de que se forme el carbonato de sodio, debido a que, por su alta solubilidad, puede permanecer en solución aún después de que han precipitado los carbonatos de calcio y de magnesio. El carbonato de sodio provoca la defloculación del suelo. Este índice (CSR) se calcula con la siguiente fórmula, donde todos los constituyentes iónicos se expresan en  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$  y los niveles de tolerancia de los cultivos se presentan en el Cuadro 4 (Anderson *et al.*, 1972).

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

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

Cuadro 4. Clasificación del agua para riego de acuerdo con el CSR

Clase de agua	Carbonato de sodio residual mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>
Buena	< 1.25
Condicionada	1.25 – 2.50
No recomendable	> 2.50

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

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

Con 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  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) invariablemente causan problemas de infiltración. Las partículas más pequeñas de un suelo, así dispersadas, obstruyen el espacio poroso y sellan la superficie del suelo, reduciendo notablemente la infiltración (McNeal *et al.*, 1968).

Las aguas de alta concentración iónica y con predominio del ion sodio también provocan problemas de infiltración. Fine *et al.* (1959), Oster (1994), y Pupisky y Shainberg (1979) 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 1).

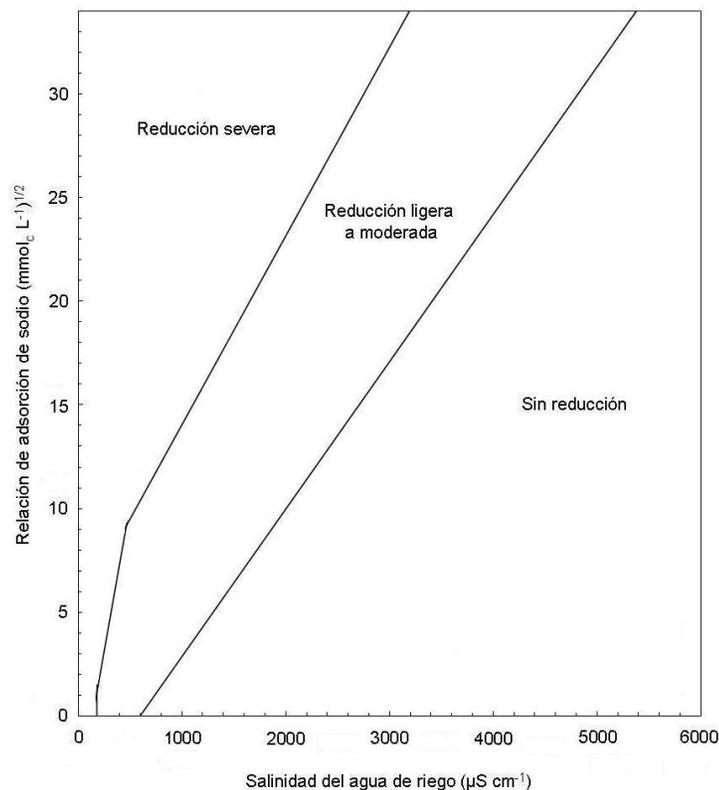


Figura 1. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio. (Fuente: Oster y Schroer, 1979).

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

Consecuentemente, los agregados de esta capa superficial se dispersan en partículas mucho más pequeñas que obturan 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.

#### 5.8 Evaluación del agua para riego con base en los elementos tóxicos para los cultivos

Cuando nos referimos a los problemas de toxicidad de algunos elementos contenidos en las soluciones acuosas, sobre los cultivos, es preferible considerar también el efecto osmótico de la salinidad, ya que los efectos físicos en las plantas son muy similares.

En la naturaleza, los elementos generalmente se encuentran formando sales, por lo que es más común referirse a ellos como sales. Los efectos osmóticos y tóxicos dependen de la concentración y de las propiedades fisicoquímicas de las sales. Cada sal tiene un efecto distinto sobre las plantas y su efecto se ve reflejado de mayor o menor intensidad en cada etapa de desarrollo de la planta (Maas, 1990).

La parte osmótica puede ser explicada en términos de la concentración, a mayor concentración menor potencial osmótico y por tanto menor disponibilidad del agua para las plantas (Casierra y Rodríguez, 2006; Baccaro *et al.*, 2006). Con respecto a la toxicidad, una alta concentración de las sales causará efectos tóxicos en las plantas, el grado de toxicidad dependerá del tipo de sal predominante (Sánchez *et al.*, 2002). Por ejemplo, Morales *et al.* (2006) encontraron reducciones en el contenido de clorofilas por unidad de masa fresca y en la fluorescencia, cuando las plantas se expusieron a tratamientos salinos con NaCl.

Strogonov (1964) presenta los resultados de un experimento donde se evalúa el efecto osmótico y tóxico de las sales (Cuadro 5). En este experimento se usó la sal NaCl para evaluar la toxicidad y manitol para el efecto osmótico, ya que esta última no aporta valor nutritivo ni tóxico. Ambos componentes se ajustaron cada uno, a 12 atm. En este experimento se pudo comprobar que el efecto tóxico es más dañino que el osmótico.

Cuadro 5. Efecto de soluciones isoosmóticas de NaCl y manitol sobre el crecimiento de raíces aisladas de alfalfa.

Medio	Crecimiento de la raíz principal después de siete días		Comentarios
	mm	% de control	
Control	140	100	Crecimiento intenso de la raíz principal y lateral
NaCl	15	10.7	Minada inhibición del crecimiento de la raíz principal y no se formaron raíces laterales
Manitol	80	57.1	Crecimiento relativamente fuerte de la raíz principal y lateral

Goykovic y Saavedra (2007) mencionan, sobre los efectos tóxicos, que el aumento de la concentración de iones específicos absorbidos por las células de la raíz, en virtud de su elevada concentración en el suelo y la disminución de la absorción de otros iones esenciales para el metabolismo celular, reducen el crecimiento de la raíz y del resto de los órganos de la planta.

Bajo esta condiciones salinas, las plantas no fotosintetizan completamente, ya que en tales condiciones, las hojas realizan funciones de secreción y de excreción de sales, así como también sirven de órganos de reserva. Las hojas funcionan como órganos de reserva al movilizar y acumular almidones como respuesta a la reducción del flujo del agua a través del sistema y a la disminución del dióxido de carbono intercelular, causada por el cierre estomatal; potenciando con esto un incremento en

la respiración. Nilsen y Orcutt (1996) y Bates y Hall (1981) mencionan que la respuesta de la planta ante un déficit hídrico es el cierre de los estomas.

Al respecto, Strogonov (1964) menciona que la salinidad produce características típicas de succulencia, causando una disminución en las células epidérmicas de las hojas y disminución del número de estomas por unidad de área foliar. Por ejemplo, Salas *et al.* (2001) investigaron el efecto de la salinidad en el cultivo de tomate y encontraron que la salinidad produjo un descenso en la densidad estomática en la cara adaxial de las hojas a medida que aumenta la conductividad eléctrica de los tratamientos. Parés *et al.* (2008) concluye en una investigación similar que la salinidad del agua de riego causa una reducción del índice estomático y del número de estomas por unidad de área al inicio de la etapa reproductiva, y que el espesor del tejido foliar se incrementa por efecto de los tratamientos salinos.

Ante el cierre estomatal, la transpiración se abate y la respiración se acelera a causa de la presión osmótica del medio. Esto es comprensible desde el punto de vista del esfuerzo y gasto de energía que la planta tiene que realizar para poder absorber el agua de menor potencial en la raíz. Al requerir un mayor consumo de energía, las plantas van acumulando energéticos como sacarosa, almidón, aceites orgánicos, entre otras, que actúan como sustratos respiratorios, para generar un mayor potencial en la planta y así poder extraer el agua del suelo. Estas acumulaciones son causa de las características de succulencia que menciona Strogonov (1964) ya que el agua se mueve de un potencial osmótico mayor a una de menor potencial osmótico.

Silva *et al.* (2007) mencionan que un mecanismo de defensa de la planta ante el estrés es el ajuste osmótico, que consiste en la acumulación de solutos en respuesta al déficit hídrico y la disminución del potencial hídrico total de hojas, tallos y raíces; como resultado, las plantas pueden absorber agua y mantener la actividad fisiológica. La acumulación activa de solutos en la célula puede contribuir a mantener el turgor, factor importante para el crecimiento y sobrevivencia durante el estrés

hídrico (Morales *et al.*, 2008). Almeida y Gisbert (2006) mencionan que este ajuste osmótico lleva consigo un gasto de energía que se traduce, entre otros efectos, en una disminución del crecimiento vegetativo y de la productividad de las plantas.

#### 5.8.1 Evaluación del agua para riego con base en la presión osmótica

El potencial osmótico es el componente del potencial del agua, que resulta de la presencia de partículas de soluto y es equivalente a la presión osmótica en concepto, pero de signo opuesto. El potencial osmótico puede ser expresado en términos de energía, mientras que la presión osmótica siempre se expresa en términos de presión (Ramírez, 1988). Para el cálculo de la presión osmótica se tiene la siguiente ecuación que resulta de la combinación de la ley de Boyle, la ley de Charles y la ley de Avogadro (Chang, 2007).

$$\pi V = nRT$$

Donde:

$\pi$  = Presión osmótica (atm)

n = Concentración de la solución (mol)

R = Constante general de los gases (L atm mol<sup>-1</sup>/K mol)

T = Temperatura absoluta (K)

V = Volumen ocupado (L)

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

$$\pi = cRT$$

En esta ecuación c es la molaridad de la disolución (Benson, 2007; Valencia y Garín, 2007).

Richards (1990), en base a datos experimentales del personal de laboratorio de los Estados Unidos, propone la siguiente ecuación para la estimación de la presión osmótica.

$$\pi = 0.36 \text{ CE}$$

Donde:

$\pi$  = Presión osmótica (atm)

CE = Conductividad eléctrica (dS m<sup>-1</sup>)

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

$$\pi = 0.36 \text{ CE}$$

$$\text{STD} = 640 \text{ CE}$$

$$\text{CE} = \pi/0.36$$

$$\text{CE} = \text{STD}/640$$

Estableciendo la igualdad tenemos:

$$\pi/0.36 = \text{STD}/640$$

$$\pi = 0.36/640 \text{ STD}$$

$$\pi = 5.625 \times 10^{-4} \text{ STD}$$

Donde:

$\pi$  = Presión osmótica (atm)

CE = Conductividad eléctrica (dS m<sup>-1</sup>)

STD = Sólidos totales disueltos (mg L<sup>-1</sup>)

Con respecto a la evaluación del efecto tóxico de los iones del agua, se presentan los iones comúnmente evaluados y sus valores de tolerancia.

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

El boro es un microelemento esencial para el crecimiento de las plantas en cantidades relativamente pequeñas y se vuelve tóxico cuando sobrepasa estos niveles (Ayers y Westcot, 1987). Así como niveles elevados producen daños, la deficiencia de boro también produce síntomas apreciables en muchas especies (Richards, 1990). El boro es absorbido por las raíces junto con el agua, acumulándose en las hojas y otras partes de la planta (Pizarro, 1985).

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

Las aguas superficiales rara vez contienen niveles tóxicos de boro, pero los nacimientos de agua y las aguas de pozos pueden contener concentraciones tóxicas, principalmente las que se encuentran en la cercanía de fallas sísmicas y áreas geotérmicas. Puede ser lavado del suelo, pero si desde un principio las concentraciones son elevadas, aun cuando la concentración de las otras sales se reduzca a un nivel de relativa seguridad, puede quedar en el suelo una cantidad suficiente de boro que cause problemas a las plantas (Richards, 1990). El contenido de boro en las aguas de riego se expresa en  $\text{mg L}^{-1}$  y los valores de tolerancia establecidos por Wilcox en 1948, citado por Thorne y Peterson (1949), se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Límites permisibles de boro en  $\text{mg L}^{-1}$ , establecidos por Wilcox en 1948, para diferentes clases de aguas de riego.

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

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

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

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

### 5.9 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 y el más usual es el diagrama de Piper (1944). Para esto es necesario que los contenidos de los iones estén en porcentaje y sólo permiten reunir a tres aniones y/o tres cationes. A cada vértice corresponde el 100% de un anión y/o catión. La forma más usual es el porcentaje de los valores en  $\text{mmol}_e$ .

L<sup>-1</sup>. Los iones representados en este diagrama son: como aniones, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup> y como cationes Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>.

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 2):

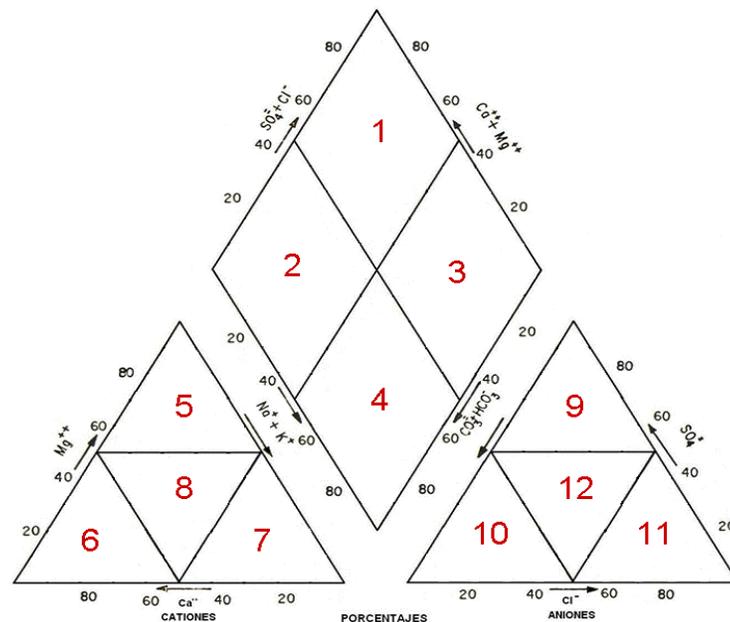


Figura 2. Sistema de clasificación hidrogeoquímica de aguas naturales usando el diagrama trilineal de Piper.

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.

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1 Ubicación y caracterización del área de estudio, y distribución espacio-temporal de las diferentes estaciones de muestreo

La zona de estudio comprende dos áreas, la Cuenca del Oriental y la Sierra Norte del estado de Puebla. La primera corresponde, fisiográficamente al Eje Neovolcánico y la segunda a parte del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre Oriental.

Con la finalidad de comprender las dimensiones de las aguas superficiales y subterráneas en las áreas de muestreo, se hizo un recorrido preliminar en la parte montañosa de la Sierra Norte del estado de Puebla que comprendió las poblaciones de Chignahuapan, Zacatlán, San Juan Apulco y Zacapoaxtla. En la zona de la Cuenca del Oriental se hizo un recorrido que incluyó a las siguientes poblaciones: El Carmen, Zacatepec, Oriental, San Salvador El Seco, Perote, Oyameles y Teziutlán.

La planicie de la Cuenca del Oriental forma parte de los Llanos de San Andrés y de la parte oriental de los Llanos de San Juan. En estas áreas se encuentran cráteres con agua denominados xalapazcos y cráteres sin agua denominados axalapazcos, constituidos por andesitas, corrientes basálticas y tobas volcánicas.

Los Llanos de San Juan es una planicie de origen lacustre que ocupa la parte norte de la meseta poblana y está limitada al norte por las estribaciones meridionales de la Sierra Norte.

#### 6.1.1 Cuenca del Oriental

##### 6.1.1.1 Localización y límites

La Cuenca del Oriental se encuentra en la parte oriente del Eje Neovolcánico, es una cuenca endorreica ubicada entre las coordenadas 97° 09' y 98° 03' de longitud oeste

y entre los 18° 48' y 19° 43' de latitud norte (Arredondo, 2002). Abarca tres estados del territorio mexicano: Puebla, Tlaxcala y Veracruz (Alcocer *et al.*, 2007). Tiene una superficie aproximada de 5250 km<sup>2</sup>. En general se puede definir como una planicie cubierta parcialmente por lagunas temporales y someras, rodeadas por altas y escarpadas montañas, cuyas cimas constituyen el parteaguas de la cuenca (Reyes, 1979). Tiene una cota promedio de 2300 m (Gasca, 1981).

#### 6.1.1.2 Marco geológico

En el interior de la cuenca se encuentran unidades orográficas perfectamente definidas, como el núcleo riolítico que forman las crestas de Las Derrumbadas y el Cerro Pinto en la parte centro-oriental; el Cerro Pizarro es otra prominencia que domina toda la cuenca desde el NE (Riggs y Carrasco, 2004).

Durante el Cretácico se desarrollaron grandes depósitos marinos calcáreos en el área. Con los movimientos del intenso plegamiento que sufrió la corteza a principios del Terciario, los sedimentos marinos emergieron formando anticlinales que han sido erosionados y sinclinales que han sido rellenados, quedando tan sólo una pequeña parte de ellos (Reyes, 1979). Estos sinclinales rellenados son el basamento de la Cuenca del Oriental. Estos materiales de relleno, que en la actualidad han peneplenizado y dado configuración actual a la cuenca, son constituidos por rocas volcánicas de diferente composición, en forma de derrames lávicos y una enorme cantidad de sedimentos piroclásticos (Gasca, 1981).

##### 6.1.1.2.1 Caldera Los Humeros

Los Humeros es un centro volcánico silícico formado en la edad Pleistocénica, ubicado en el extremo oriental del Eje Neovolcánico. Se encuentra en una sucesión sedimentaria mesozoica,  $\leq 3000$  m de espesor, principalmente de calizas y lutitas, que han sido dobladas y falladas durante la compresión Laramide e intrusión de granodiorita y poblaciones de sienita a principios del Terciario. Estas sucesiones se

creo que sobreyacen sobre basamentos cristalinos metamórficos e intrusivos del Paleozoico, esto se expone en el macizo de Teziutlán, al noreste de Los Humeros. Las rocas sedimentarias Mesozoicas están cubiertas por lavas andesíticas y ferrobasálticas (datadas en 3.50 y 1.55 Ma) que están expuestas al norte de Los Humeros y han sido intersectadas en perforaciones en la caldera.

El centro volcánico Los Humeros se desarrolló en tres etapas principales. Lavas Precaldera compuestas de riolita con alto contenido de sílice eyectadas durante la primera etapa, que culminó con la erupción (~460 mil años) de la ignimbrita Xaltipan de riolita de alto contenido de sílice y el colapso de los 21 por 15 km de la caldera Los Humeros. La segunda etapa comenzó con la extrusión de un alto contenido de sílice en el domo de riolitas (~360 ka) y riolitas de hiperstena a lo largo de una fractura arqueada, y continuó con una serie de erupciones explosivas plinianas y sub-plinianas (~240 ka) que produjo una sucesión de flujos de capas de pómez riodacítica-andesítica, conocidos como la Toba Faby. La tercera etapa comenzó alrededor de 60-100 ka con la erupción de los 15 km<sup>3</sup> de la toba riodacítica Zaragoza acompañada por la formación de la caldera Los Potreros con 9 km de diámetro. Esto fue seguido por la erupción de un 0.6 km<sup>3</sup> de depósitos de pómez dacítica; 6 km<sup>3</sup> de lavas de andesita y andesita basáltica y conos de escoria (40 y 30 ka), y por la erupción de aproximadamente 1 km<sup>3</sup> de tefra riodacítica y andesítica de la ribera sur de Los Potreros y la formación de los 1.7 kilómetros de diámetro de la caldera El Xalapaxco. Posteriormente, se han localizado levantamientos vulcanotectónicos, erupciones de ~10 km<sup>3</sup> de lavas andesíticas y riodacíticas de 20 ka, y la erupción de ~0.25 km<sup>3</sup> de lavas basálticas de olivino de la zona de fractura del anillo sur de Los Humeros. El sistema geotérmico se mantiene activo.

En general, las erupciones en Los Humeros se hicieron más pequeñas, cada vez más máficas, y más frecuentes con el tiempo. Se infiere que existieron magmas máficos a través de la historia del centro, justo debajo de los niveles de explosión, porque las tres principales unidades silícico piroclásticas (Xaltipan, Faby y Zaragoza) contienen pequeñas porciones de andesita y andesita basáltica. Se atribuye esta

tendencia a una disminución progresiva de la integridad estructural de la zona de techo de la cámara magmática como erupciones sucesivas de formación de la caldera reactivaron antiguas zonas de debilidad y creó otros nuevos. Por lo tanto, el magma escapó con mayor frecuencia, con menos tendencia al desarrollo de grandes, evoluciones de cuerpos de magma (Carrasco y Branney, 2005).

#### 6.1.1.3 Hidrología

La hidrología superficial es prácticamente inexistente puesto que la mayor parte de la superficie de la cuenca corresponde a material de tipo cinerítico de edad reciente, en el que la mayoría de las aguas se filtran debido a la alta permeabilidad del material; se puede decir que la mayor parte del sistema hidrográfico es de tipo torrencial. Gasca (1981) menciona que la constitución litológica de la planicie da como resultado una alta permeabilidad, por lo que su red hidrográfica no está desarrollada y sólo se encuentran cauces bien definidos en las faldas de los volcanes mayores. Sobresalen los grandes abanicos aluviales que se forman en las laderas de los volcanes que limitan la cuenca. En la parte central existen dos lagunas efímeras, la de Totolcingo y la de Tepeyahualco, alimentadas por arroyos torrenciales e intermitentes.

En cuanto a la hidrología subterránea, la mayoría de los acuíferos explotados en el estado de Puebla, son de tipo libre y relativamente poco profundos; los niveles estáticos fluctúan entre 2 y 80 m (INEGI, 2010). El agua disponible se encuentra en su mayor parte en la Cuenca del Oriental, en donde la mayor parte de los escurrimientos pluviales se infiltran hacia el subsuelo y forman un manto acuífero extenso, el cual constituye un recurso de abastecimiento hídrico muy valioso (Alcocer *et al.*, 2005).

Los manantiales más importantes son: El Carmen, Estación Manantiales y el Manantial de Vicencio. Existen 6 cuerpos de agua denominadas lagos cráter.

#### 6.1.1.3.1 Lagos cráter

Las estructuras volcánicas conocidas como maars, fueron reconocidas originalmente como pequeños lagos cráter en el distrito volcánico Cuaternario de Eiffel, Alemania, derivando el término del latín “mare” que expresa mar. Los cráteres de explosión o maars, son también conocidos en México por el nombre general de “axalapazcos”. Además de los axalapazcos, que son cráteres con agua, también existen en el área cráteres sin agua, denominados “xalapazcos”.

Los lagos cráter o maars se definen como pequeños edificios volcánicos de muy bajo relieve o sin éste, generalmente son más anchos que profundos. Comúnmente, el piso del cráter se mantiene bajo el nivel general de la topografía que lo rodea. Se forman por explosiones de vapor que ocurren cuando el magma ascendente hace contacto con agua subterránea o superficial, este fenómeno se conoce como hidrovulcanismo (Martin *et al.*, 2007) o freatomagmatismo (Gasca, 1981).

En el interior de la Cuenca del Oriental, entre los poblados de San Salvador El Seco y Perote, se encuentran dos llanos de origen lacustre, los Llanos de San Andrés y los Llanos de San Juan. En los Llanos de San Andrés se encuentran los lagos cráter de Aljojuca y Tecuitlapa, y cinco cráteres, el Cono Tepéxitl, Buenavista, Jalapazquillo, Xalapazco El Grande y Xalapazco El Chico; en los Llanos de San Juan, los lagos cráter de Atexcac, La Preciosa, Quechulac y Alchichica (Ramírez y Vázquez, 1989; Arredondo, 2002).

Lago cráter Alchichica. Su diámetro es aproximadamente 1900 m; la composición litológica no es simétrica, en la parte occidental las capas de pómez y tezontle están interestratificadas con derrames basálticos (Gasca, 1981; Reyes, 1979). Haro (1911) cita que el lado oeste es dominado por una cresta de escorias, de cerca de 150 m de altura, que desciende progresivamente hacia el sur y hacia el norte, los cantiles se componen de cenizas volcánicas que parecen descansar sobre un hermoso basalto negro con cristales de peridoto.

Lago cráter Atexcac. Se localiza en el área limitada por las Derrumbadas y la Sierra Blanca, interdigitándose uno de los abanicos aluviales del norte de las Derrumbadas con las cenizas y material piroclásticos provenientes de la erupción formadora de este cono. Tres de sus lados corresponden a un derrame basáltico (Carrasco *et al.*, 2007). La profundidad del lago actualmente, de acuerdo con Macek *et al.* (2007), es de 36 m.

Lago cráter Quechulac. Es un cráter de unos 500 m de diámetro, simétrico, formado por ceniza andesítica y lapilli de pómez. Su forma es burdamente elíptica; su eje mayor en dirección este-oeste alcanza una longitud de 1200 m y el menor de 800 m. Es una oquedad con una somera elevación en los bordes; la pendiente externa, que varía entre 12° y 15° está formada por capas de depósitos piroclásticos. El desnivel promedio entre el borde de la laguna y el espejo del agua es de 30 m.

Lago cráter La Preciosa. La laguna tiene una forma irregular alargada, cuyo diámetro mayor es de aproximadamente 1800 m, de orientación noreste-suroeste; la forma irregular posiblemente sea el producto de varias erupciones simultáneas que causaron varias oquedades circulares contiguas, que quizás alcancen el número de tres o cuatro. En toda la periferia se puede observar que las paredes de este lago están formadas por el material gris-blanquizco, producto de la erupción. En su flanco norte sólo se logra ver un pequeño cuerpo de unos 4 m de altura formados por ceniza semiconsolidada de pómez y material andesítico muy fino. Las capas subyacentes depositadas antes de esta erupción no se observan, pues la altura mínima del borde de la planicie sobre el espejo de agua es de 8 m, por lo que estas capas se encuentran cubiertas por el agua de la laguna.

Lago cráter Aljojuca. Está formado por depósitos cineríticos y piroclásticos gruesos, predominando el tezontle sobre la pómez y los fragmentos de roca andesítico-basáltico. Existen, sin embargo, irregularidades topográficas menores al norte y noreste de Aljojuca, compuesta por tobas alteradas, y un conjunto de tres conos cineríticos recientes, los cuales están bordeados por un derrame andesítico.

Lago cráter San Miguel Tecuitlapa. En la zona central del cráter existe un montículo cónico que es la emisión incipiente y tardía de un pequeño volcán dentro del cráter de otro volcán mayor y más temprano. Este cono interno está formado por tezontle limonitizado y lapilli de pómez y andesita. Consiste en una serie de conos cineríticos y un domo que se encuentra en la parte central del cráter (Gasca, 1981; Reyes, 1979).

#### 6.1.1.4 Clima

Esta región tiene un clima árido con una media anual en evaporación de 1690 mm y una precipitación de 500 mm (intervalo entre 1966 a 2002); una temperatura entre -5.5 a 30 °C con una media de 12.9 °C (Adame *et al.*, 2008).

#### 6.1.1.5 Suelos

La cuenca comprende los llanos de San Juan y San Andrés. Predominan suelos con sustrato calizo tipo Rendzina además de Regosol, Litosol, Feozem, Andosol y Cambisol. Tiene contacto con zonas tropicales húmedas al este y templadas al norte y al oeste (Fuentes, 1972).

#### 6.1.1.6 Cultivos principales

En los diversos recorridos de muestreo, en especial el recorrido que se realizó en el mes de abril de 2010 en las áreas de estudio, se identificaron las principales especies vegetales cultivadas que existen en la zona. Especies vegetales cultivadas: alfalfa, avena, cacahuate, calabaza, cebada, cebolla, cilantro, col, coliflor, frijol, haba, lechuga, maíz, papa, pasto bermuda, tomate, trigo, zanahoria, durazno, manzana y pera.

### 6.1.2 Sierra Norte

La Sierra Norte de Puebla se ubica, geológicamente, en parte en el Eje Neovolcánico y en mayor proporción en la Sierra Madre Oriental; por ello se describen, de manera general, algunas características de esta última sierra.

La formación de la Sierra Madre Oriental parece haber terminado en el Eoceno Inferior y los fenómenos volcánicos que en el Mioceno y el Plioceno Inferior tuvieron lugar, y a consecuencia de los cuales se formó el Eje Neolcánico, al rodear con un verdadero cerco a la Altiplanicie, la aislaron del drenaje oceánico y, como consecuencia, ocasionaron la formación, en ella, de numerosas cuencas lacustres.

La actividad tectónica que formó la Sierra Madre Oriental se intensificó al finalizar el Eoceno (Eguiluz *et al.*, 2000); al terminar el Mioceno, la formación de la Sierra estaba concluida.

#### 6.1.2.1 Localización y límites

La Sierra Norte de Puebla es una porción territorial de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental, subprovincia del Carso Huasteco que atraviesa por el estado de Puebla; se localiza en la parte norte-centro del mismo, entre los 19° 39' de latitud norte y 97° 15' de longitud oeste. Limita al norte con la sección de la Provincia Fisiográfica Llanura Costera del Golfo correspondiente al estado de Puebla, así como con los estados de Hidalgo y Veracruz; al sur y este con la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico porción Puebla y; al oeste con la misma Provincia Fisiográfica y el estado de Hidalgo.

#### 6.1.2.2 Marco geológico

Esta región se identifica por su carácter netamente montañoso y comprende prácticamente a toda la región serrana del norte, la cual es un elemento de la Sierra

Madre Oriental. Su clima es templado húmedo en verano. Su relieve es relativamente moderno y sus ríos presentan numerosos saltos y cascadas. Su altitud varía entre 1000 a 3000 m.

Las rocas que forman la Sierra Norte son principalmente calizas en gruesas capas, pizarras y calizas intercaladas de lutitas y areniscas, rocas casi todas del Mesozoico (Capra *et al.*, 2006). En ella, las rocas sedimentarias, dispuestas en capas de espesor variable, ofrecen diferente resistencia a los procesos erosivos y a los esfuerzos corticales, y se manifiestan en grandes estructuras plegadas y dislocadas en ángulos bajos.

Las deformaciones orogénicas son las principales formadoras del relieve original sobre el que han actuado procesos erosivos controlados por sistemas de fallas y fracturas. El agua en su efecto disolutivo ha contribuido a generar una morfología cárstica, y ha labrado a la vez profundos cañones por los que drenan diversos ríos hacia el Golfo de México.

#### 6.1.2.2.1 Caldera de Acoculco

La zona geotérmica de la Caldera de Acoculco se localiza en los límites de los estados de Puebla e Hidalgo, en el extremo oriental del Eje Neovolcánico, comprendida entre los paralelos 19° 45' y 20° 00' de latitud norte y los meridianos 98° 00' y 98° 25' de longitud oeste. A nivel regional se ha destacado que en la zona de estudio afloran rocas volcánicas pertenecientes al Eje Neovolcánico y rocas sedimentarias (secuencias calcáreas y terrígenas) de la provincia Sierra Madre Oriental (Quinto *et al.*, 1995).

Actualmente la Caldera de Acoculco se considera un sistema hidrotermal (Lermo *et al.*, 2009). En los estudios de López *et al.* (2009) se identificaron los principales minerales hidrotermales como el cuarzo, pirita, arcillas (illita, esmectita, caolinita), zeolitas (estilbita) y óxidos de hierro (hematita). Los minerales típicos del skarn

también están presentes, tales como wollastonita, granate, diopsida y epidota, además de sulfuros de cobre. Los minerales secundarios se encuentran principalmente reemplazando a los minerales primarios o rellenando poros, vetillas y oquedades.

#### 6.1.2.3 Hidrología

La región hidrológica Tuxpan-Nautla comprende la parte Norte del estado de Puebla, representada por partes de las cuencas de los ríos Tecolutla, Cazones y Tuxpan.

El río Tecolutla es la corriente más característica de la Sierra Norte de Puebla y se forma por las siguientes corrientes: Necaxa, Tenango, Laxaxalpan, Tecuantepec o Zempoala, Joloapan, Apulco y Chichicatzapa. Con aguas de la parte alta de las tres primeras corrientes, se construyó el importante sistema hidroeléctrico de Necaxa. En su rivera se localiza la ciudad de Gutiérrez Zamora y descarga en el cauce del río Tecolutla.

#### 6.1.2.4 Clima

La distribución climática en la Sierra Norte de Puebla se presenta en una serie de franjas orientadas noroeste-sureste, y en ese sentido los climas varían de cálidos a templados, donde los cambios se realizan paulatinamente conforme aumenta o disminuye la altitud.

Los climas cálidos imperan sobre las laderas orientales de la sierra, más o menos hasta 1000 m de altitud; se caracterizan porque sus temperaturas medias anuales oscilan entre 16 y 22 °C.

El clima cálido subhúmedo con lluvias en verano se distribuye en las partes más bajas del noreste poblano, en los límites con el estado de Veracruz, donde la precipitación total anual es menor a 1500 mm.

#### 6.1.2.5 Suelos

Las principales unidades de suelos que caracterizan a la Sierra Norte de Puebla son: 1) Cambisol éutrico, 2) Regosol éutrico y cálcico, 3) Feozem háplico, 4) Luvisol crómico, 5) Andosol húmico y órtico, y Vertisol pélico (Pérez, 1992).

#### 6.1.2.6 Cultivos principales

En los diversos recorridos de muestreo, en especial el realizado en el mes de abril de 2010, se identificaron las principales especies vegetales cultivadas que existen en la Sierra Norte. Las principales especies vegetales cultivadas son: cacahuate, café, calabaza, cilantro, durazno, frijol, haba, maíz, naranja, papa, pimienta, alfalfa, avena, cebada, tomate, trigo, manzana, pera, zarzamora.

#### 6.2 Muestreo de aguas y suelos

En concordancia con los objetivos de este estudio, donde sólo cuenta con una población y aguas superficiales independientes de las subterráneas, o suelos regados con estas aguas, aquí en particular se pretende, mediante la búsqueda sistemática de asociaciones de los diferentes parámetros (mediciones), establecer el carácter físico-químico de estas aguas y sus efectos en los suelos y cultivos.

Con la finalidad de conocer mejor la amplitud de las variaciones de los diferentes parámetros (mediciones) de las características físico-químicas de la población de las aguas superficiales y subterráneas de la Sierra Norte y la Cuenca del Oriental del estado de Puebla, y debido a la imposibilidad de muestrear toda la población de una sola vez, se tomó la decisión de realizar dos muestreos: muestreo en primavera 2008 con 54 puntos de muestreo, y muestreo en otoño 2008 con 45 puntos de muestreo. Se establecieron 74 estaciones de muestreo en las dos áreas de estudio, 46 estaciones en la Cuenca del Oriental y 28 en la Sierra Norte.

En la Cuenca del Oriental se tomaron muestras de agua y suelo en las dos principales depresiones o áreas de riego que caracterizan el área de estudio. La primera depresión corresponde a la laguna de Totolcingo y la segunda a la laguna de Tepeyahualco. Las muestras de agua se tomaron en pozos, norias, nacimientos, lagunas y lagos cráter; esto con el objetivo de contar con una diversidad de fuentes de agua que permitan conocer la composición y distribución iónica en las aguas de la cuenca.

En la Sierra Norte se tomaron muestras de agua a lo largo de todo el área (sureste-noroeste) con el fin de contar con una mayor representatividad de las aguas superficiales que circulan en el área, así también, se tomaron muestras de agua en los principales nacimientos en el área de la caldera de Acoculco.

La toma de muestras se realizó con base a la NOM-014-SSA1-1993. El conocimiento de la amplitud numérica de los distintos parámetros conlleva a la identificación de la prevalencia de ciertos procesos en las aguas superficiales y subterráneas, y en los suelos que se riegan con estas aguas. En la Figura 3 se presenta la ubicación de las diferentes estaciones de muestreo de aguas, y en los Cuadros A1 y D1 de los Anexos A y D, respectivamente, las identificaciones y altitudes.

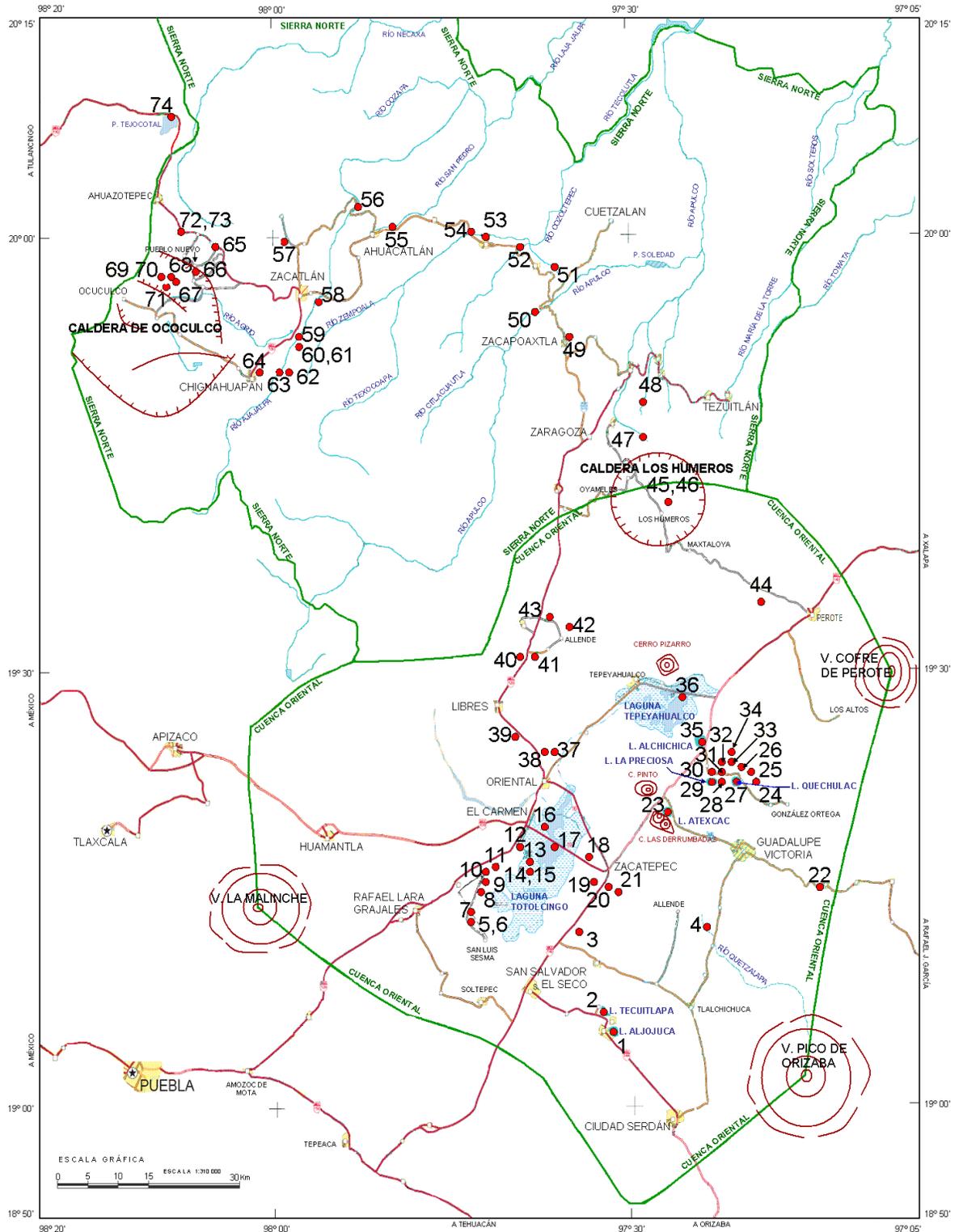


Figura 3. Ubicación de los puntos de muestreo de aguas en la Cuenca del Oriental y en la Sierra Norte. Estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

En la Figura 4 se presenta la ubicación de los sitios de muestreo de suelos que corresponden a las estribaciones lacustres de Totolcingo y Tepeyahualco.

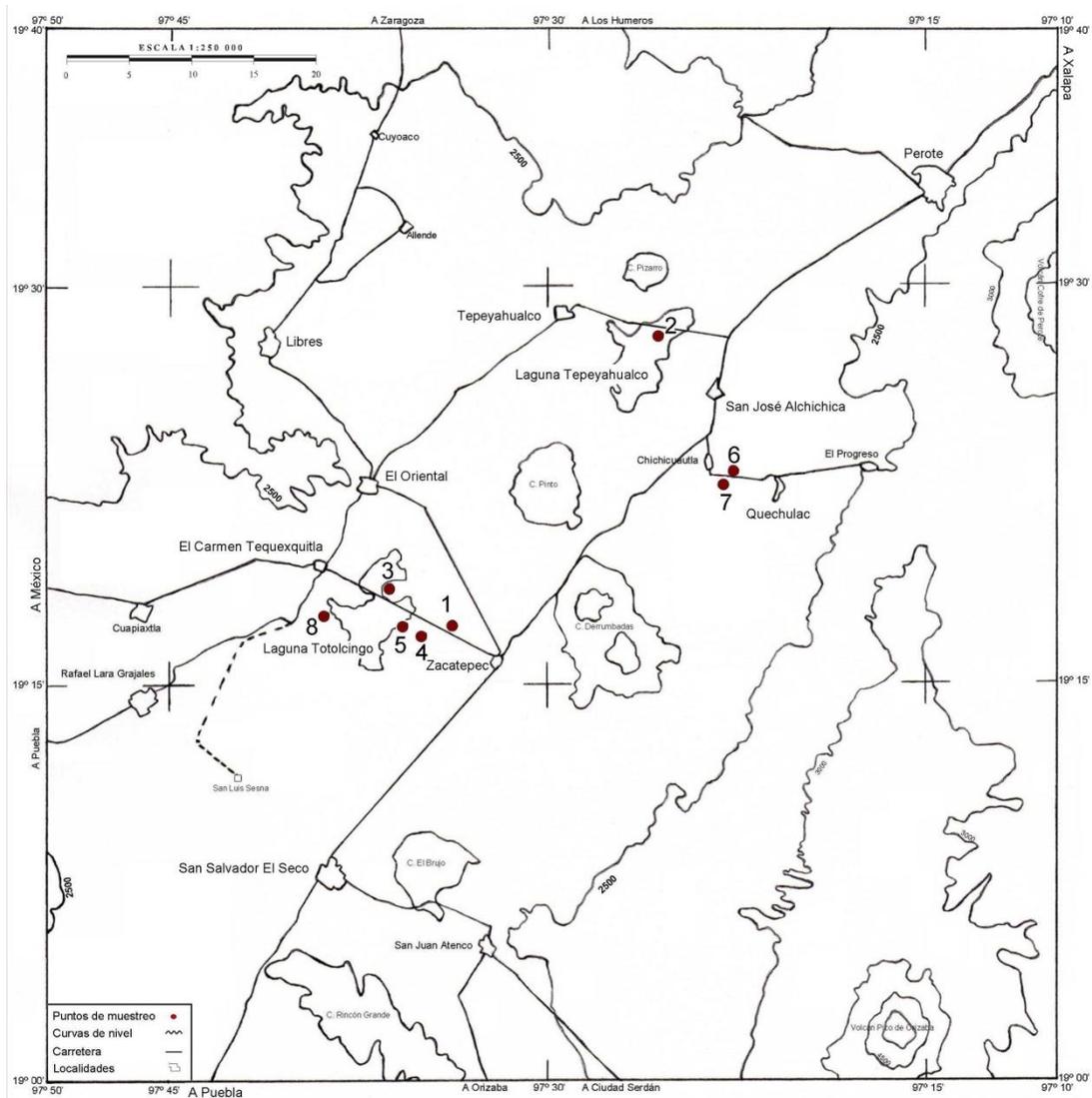


Figura 4. Ubicación de los puntos de muestreo de suelos en la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

### 6.3 Métodos analíticos para la determinación de los parámetros físico-químicos

En el Cuadro 7 se presentan las determinaciones físico-químicas que se realizaron en cada muestra de agua y extracto de saturación (pasta de saturación y relación suelo agua 1:5).

Cuadro 7. Marchas analíticas utilizadas para las determinaciones físico-químicas en aguas y suelos de la Cuenca del Oriental y Sierra Norte. Estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

Determinación	Método	Referencia
pH	Potenciométrico	Eaton <i>et al.</i> , 1995
Conductividad eléctrica	Conductimetría	Richards, 1990
Residuo seco evaporado	Gravimetría	Eaton <i>et al.</i> , 1995
Residuo seco calcinado	Gravimetría	Eaton <i>et al.</i> , 1995
Calcio y magnesio	Volumetría	Richards, 1990
Sodio y potasio	Flamometría	Greenberg <i>et al.</i> , 1992
Carbonatos y bicarbonatos	Volumetría	Richards, 1990
Cloruros	Volumetría	Richards, 1990
Sulfatos	Turbidimetría	Eaton <i>et al.</i> , 1995
Ortofosfatos	Colorimetría	Rodier, 1990
Boro	Colorimetría	Bingham, 1982
Nitratos	Colorimetría	Robarge <i>et al.</i> , 1983
Presión osmótica	Osmometría	VAPRO, 1995
Humedad	Gravimetría	NOM-O21-SEMARNAT-2000
Capacidad de intercambio catiónico	Pfeffer	Pfeffer y Kozhevnikov, 1967

Con el propósito de tener valores límite de referencia para nuestras mediciones de las diferentes características físico-químicas de las aguas superficiales y subterráneas, en el Cuadro 8 se presentan las directrices sobre la calidad del agua.

Cuadro 8. Directrices para interpretar la calidad de las aguas para riego

Problema potencial	Unidades	Grado de restricción de uso		
		Ninguna	Ligera a moderada	Severa
Salinidad (afecta la disponibilidad de agua para el cultivo)				
CEa	$\mu\text{S cm}^{-1}$	< 700	700 – 3000	> 3000
TSD	$\text{mg L}^{-1}$	< 450	450 – 2000	> 2000
Infiltración (reduce infiltración; se evalúa usando conjuntamente la CEa y la RAS)				
	RAS	CEa		
	0 – 3	> 700	700 – 200	< 200
	3 – 6	> 1200	1200 – 300	< 300
	6 -12	> 1900	1900 – 500	< 500
	12 – 20	> 2900	2900 – 1300	< 1300
	20 – 40	> 5000	5000 – 2900	< 2900
Toxicidad de iones específicos (afectan cultivos sensibles)				
Sodio ( $\text{Na}^+$ )				
Riego por superficie	RAS	< 3.0	3.0 – 9.0	> 9.0
Riego por aspersión	$\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$	< 3.0	> 3.0	
Cloro ( $\text{Cl}^-$ )				
Riego por superficie	$\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$	< 4.0	4 -10	> 10.0
Riego por aspersión	$\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$	< 3.0	> 3.0	
Boro ( $\text{B}^{3+}$ )	$\text{mg L}^{-1}$	< 0.7	0.7 – 3	> 3.0
Varios(afectan cultivos sensibles)				
Nitrógeno ( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )	$\text{mg L}^{-1}$	< 5.0	5.0 -30.0	> 30.0
Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) (aspersión foliar únicamente)	$\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$	< 1.5	1.5 – 8.5	> 8.5
pH		Amplitud normal: 6.5 – 8.4		
* $\text{Cl}/\text{SO}_4 >$		Halofitismo (suculencia)		
* $\text{Cl}/\text{SO}_4 <$		Xerofitismo (leñosidad)		
* $\text{HCO}_3/\text{Cl}+\text{SO}_4 >$		Viscosidad de las paredes celulares		

Fuente: Ayers y Westcot, 1987; \*Velázquez, 2001.

#### 6.4 Determinación de bases intercambiables

La determinación de cationes intercambiables en suelos salinos, con solución de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  0.1 N en alcohol etílico al 70% (p/v) a pH 7, se basa en el desplazamiento de los cationes intercambiables por los iones amonio de la solución alcohólica de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  0.1 N. La razón por la cual se utiliza este método como estimador es que el yeso y los carbonatos de calcio y magnesio son insolubles en el reactivo Pfeffer (Pfeffer y Kozhevnikov, 1967).

Para suelos con alto contenido de sales solubles, el extracto de suelo obtenido con solución alcohólica de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  0.1 N contiene a los cationes intercambiables y a los solubles. El contenido de ambas formas (intercambiables y solubles) recibe el nombre de cationes extraíbles con dicho reactivo. Para el cálculo de los cationes intercambiables se deben restar los cationes solubles de los extraíbles.

La solución de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  0.1 N en alcohol etílico al 70% o reactivo Pfeffer, se obtiene al disolver 5.35 g de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  en 270 mL de agua destilada, se agrega 730 mL de alcohol etílico al 96% y se ajusta a pH 7 con hidróxido de amonio ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ).

El procedimiento de preparación del extracto consiste en pesar 5 g de suelo de cada una de las muestras y transferir a un matraz Erlenmeyer de 250 mL; luego se añade 100 mL de la solución Pfeffer, se agita y se deja reposar por 24 horas.

Transcurrido el tiempo se toma una alícuota de 50 mL de la solución extractada de cada una de las muestras y se transfiere a una cápsula de porcelana o a un vaso de precipitados, y se pone a secar a 105 °C hasta obtener el residuo seco evaporado y haber eliminado las sales de amonio. Se deja enfriar y se añade 50 mL de agua destilada para disolver las sales extraídas con el reactivo Pfeffer. En este extracto acuoso se determinan los contenidos de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ .

Cálculos:

$$\text{Ca extraíble en mmol}_c / 100 \text{ g de suelo} = \frac{\text{mmol}_c \text{ Ca L}^{-1} \times \text{mL filtrado} \times \text{mL Pfeffer} \times 100}{1000 \times \text{mL filtrado} \times \text{g de suelo}}$$

$$\text{Mg extraíble en mmol}_c / 100 \text{ g de suelo} = \frac{\text{mmol}_c \text{ Mg L}^{-1} \times \text{mL filtrado} \times \text{mL Pfeffer} \times 100}{1000 \times \text{mL filtrado} \times \text{g de suelo}}$$

$$\text{Na extraíble en mmol}_c / 100 \text{ g de suelo} = \frac{\text{mmol}_c \text{ Na L}^{-1} \times \text{mL filtrado} \times \text{mL Pfeffer} \times 100}{1000 \times \text{mL filtrado} \times \text{g de suelo}}$$

$$\text{K extraíble en mmol}_c / 100 \text{ g de suelo} = \frac{\text{mmol}_c \text{ K L}^{-1} \times \text{mL filtrado} \times \text{mL Pfeffer} \times 100}{1000 \times \text{mL filtrado} \times \text{g de suelo}}$$

Una vez obtenido los valores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  extraíbles en  $\text{mmol}_c$  por 100 g de suelo, se le restan los valores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  solubles en  $\text{mmol}_c$  por 100 g de suelo obtenidos del extracto de suelo a saturación, para estimar los cationes intercambiables en  $\text{mmol}_c$  por 100 g de suelo.

#### 6.5 Análisis estadístico (asociación de variables)

Para conocer la dependencia o asociación funcional entre las variables obtenidas en una muestra de una población determinada, la regresión lineal se convierte en la herramienta más adecuada (Méndez *et al.*, 1990). En esta investigación se calibró un modelo lineal sin ordenada o ajustada al origen mediante la técnica del análisis de regresión lineal (Ramírez, 1988). El ajuste del modelo se realizó al relacionar la concentración de las soluciones en  $\text{mg L}^{-1}$ , la concentración en  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$  y la presión osmótica en atm, con la conductividad eléctrica en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , con el método de mínimos cuadrados. El modelo tiene la estructura siguiente:

$$Y = f_a X$$

Donde:

Y = Puede representar la concentración de la solución en mg L<sup>-1</sup>, en un primer caso; la concentración cationes de la solución en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, en un segundo caso; y en un tercer caso la presión osmótica teórica en atm.

$\alpha$  = Es la pendiente de la recta, que significa el número de unidades en que aumenta Y por cada unidad de X.

X = Es la conductividad eléctrica de la solución en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

## 6.6 Evaluación de los datos analíticos

Se verificó la exactitud de los valores analíticos mediante dos métodos de comprobación recomendados por Eaton *et al.* (1995). El primero se basa en el balance iónico entre aniones y cationes, y el segundo en la conductividad eléctrica medida y la calculada. La primera se basa en que la suma de aniones y cationes, expresados en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, deben 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:

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

Y el criterio de aceptación se presenta en el Cuadro 9:

Cuadro 9. Criterio de aceptación del balance anión-catión.

Suma de aniones (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	% de diferencia aceptable
0.0 – 3.0	± 0.2
3.0 – 10.0	± 2.0
10.0 – 800.0	5.0

El segundo se basa en que la conductividad eléctrica medida debe ser aproximadamente igual a la conductividad eléctrica calculada. Si la conductividad eléctrica calculada es mayor que la medida, se debe analizar de nuevo la suma mayor de iones. El rango aceptable es como sigue:

$$0.9 < \frac{CE_{calculada}}{CE_{medida}} < 1.1$$

Para el cálculo de la conductividad eléctrica calculada se emplean los factores enlistados en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Factores de conductividad para iones comúnmente encontrados en el agua.

Ion	Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ , a 25 °C)	
	Para $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$	Para $\text{mg L}^{-1}$
Bicarbonato	43.6	0.715
Calcio	52.0	2.600
Carbonato	84.6	2.820
Cloro	75.9	2.140
Magnesio	46.6	3.820
Potasio	71.0	1.150
Nitrato	72.0	1.840
Sodio	48.9	2.130
sulfato	73.9	1.540

Los resultados obtenidos en esta investigación se presentan utilizando distintas asociaciones de variables, diagramas específicos de interpretación y tablas de permisibilidad de contenidos de diferentes elementos.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La discusión de resultados analíticos obtenidos en esta investigación se basa en distintas asociaciones funcionales de variables, diagramas sintéticos específicos de interpretación y tablas de permisibilidad de contenidos de elementos. Los resultados, referentes a la composición iónica y a la concentración total electrolítica de las diferentes aguas se describen desde la perspectiva de la calidad del agua para uso agrícola. Los resultados de las mediciones de los diferentes parámetros se presentan en los anexos correspondientes. La caracterización de los suelos, que aquí se estudiaron, también por supuesto, se realiza desde la perspectiva de la acumulación de sales en los diferentes espesores de los suelos, considerando que en éstos existen distintas cantidades acumuladas de sales “in situ” debido a los procesos de intemperismo y a la depositación de sales derivada de la aplicación de aguas de diferente calidad a estos suelos.

### 7.1 Cuenca del Oriental

La Cuenca del Oriental es una cuenca endorreica, los espesores de los suelos lacustres de Totolcingo y Tepeyahualco presentan una acumulación de sales a lo largo de tiempos histórico-geológicos.

Los sedimentos lacustres, que se localizan fundamentalmente en la Cuenca del Oriental, están conformados desde su base por fragmentos de rocas de todos los tamaños (gravas, arenas, limos y arcillas) provenientes de la erosión tan intensa a la que han estado sometidas las rocas calizas, así como también de rocas ígneas intrusivas y extrusivas. Durante esta etapa de depósito tuvieron lugar diversos periodos de actividad piroclástica, cuyos productos están interestratificados con los sedimentos lacustres. Las lagunas de aguas perennes de Totolcingo y de Tepeyahualco son la evidencia actual de las condiciones que prevalecieron en esa época y que, debido al aporte a veces repentino y abundante de material piroclástico, no solo ocasionaron el desplazamiento de las aguas sino también su desaparición.

En efecto, las lagunas mencionadas han quedado restringidas debido a los grandes espesores de material pumítico, ignimbritas, tobas y cenizas volcánicas que provinieron en gran parte de la caldera de Los Humeros.

En toda la Cuenca del Oriental el nivel freático está muy cercano a la superficie, y en algunos casos aflora como sucede en las lagunas de Totolcingo y de Tepeyahualco. Debido a que tanto el nivel superior como el nivel inferior son muy someros, la evaporación es muy alta y trae consigo el depósito de gran cantidad de sales en la superficie. Además, como resultado de los cambios tan repentinos en la estratigrafía de la cuenca por las causas arriba citadas, existen en la cuenca infinidad de acuíferos confinados (Yañez y García, 1982).

#### 7.1.1 Composición iónica de las aguas

Las aguas que se muestrearon y que se utilizan en el riego de cultivos agrícolas en la Cuenca del Oriental son subterráneas. Estas aguas contienen 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. También se muestrearon aguas de diversos manantiales que no son utilizadas para riego debido a sus pequeños gastos, pero en estos nacimientos se desarrollan pequeñas actividades de tipo acuícola. Los tipos de agua que desarrollan diferentes tipos de salinización son:

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

El número de muestras de aguas con diferentes tipos de quimismo que se tienen en la población de las aguas naturales de la Cuenca del Oriental se clasificaron como sigue: 1. De composición clorhídrica, 31 muestras; 2. De composición sulfático-clorhídrica, nueve muestras, 3. De composición clorhídrico-sulfática, tres muestras; 4. De composición clorhídrica y con contenido alto de bicarbonato, una muestra. Esta última muestra es rica en iones cloruro y magnesio, y pertenece a un grupo de aguas subterráneas que se encuentran en el rancho “Los Virreyes”.

El predominio de cloruros sobre los sulfatos en las aguas de la Cuenca del Oriental ocurre en 40 muestras. Los niveles de cloruros que se recomiendan en las directrices de la calidad del agua para riego (Ayers y Westcot, 1987), cuando se utilizan métodos de riego por aspersión son  $< 3.0 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ . La Cuenca del Oriental tiene una cantidad grande de pivotes centrales que riegan por aspersión los cultivos. El número de muestras que tienen concentraciones  $> 3.0 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  de iones de  $\text{Cl}^-$  es de 10. En diez muestras de agua hay un predominio de iones de magnesio, al considerar la relación  $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+} < 1.0$ . Las aguas de riego ricas en magnesio con el tiempo irán paulatinamente saturando el complejo de intercambio catiónico con iones de sodio y de magnesio.

#### 7.1.2 Distribución de los cationes y aniones en las aguas

En la Figura 5 se presenta la distribución de cationes y aniones en las aguas de la Cuenca del Oriental registrada en primavera 2008 y en otoño 2008. La figura indica que a lo largo de todas las estaciones de muestreo, 20 de ellas tienen valores de

$\frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}} > 3.0$ . Los contenidos de iones bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) en todas las

estaciones de muestreo son considerables. El quimismo de estas aguas es del tipo sódico-bicarbonatada. Al considerar las concentraciones de los iones  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$  de manera independiente, el ion sodio ( $\text{Na}^+$ ) prevalece sobre los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en 30 muestras.

Por último, se debe mencionar que las aguas naturales que se muestrearon en la Cuenca del Oriental son sódico-magnésico-bicarbonatadas en 31 muestras, y magnésico-sódico-bicarbonatadas en 12 muestras (Anexo A, Figura A3 y A4).

En las aguas naturales se encontraron cinco muestras en donde la relación  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+} > 1.0$ ; es decir, en 38 muestras la relación  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+} < 1.0$ . Esto confirma el carácter sódico-magnésico y magnésico-sódico de las aguas de la Cuenca del Oriental.

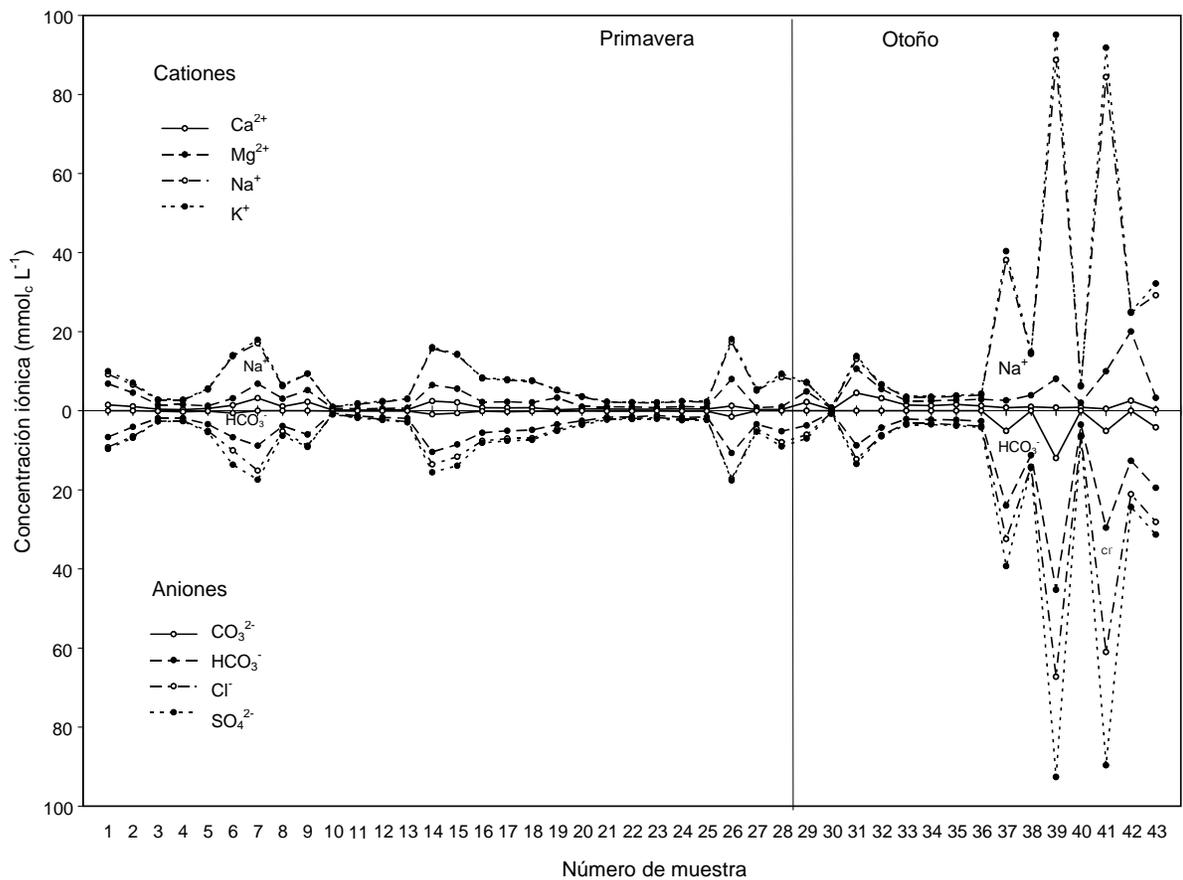


Figura 5. Diagrama de distribución iónica en las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

### 7.1.3 Distribución de concentraciones: conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y concentración catiónica (en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) en las aguas

Como se ha mencionado, la calidad del agua de riego fundamentalmente está predeterminada por la concentración total electrolítica y por la composición relativa de los diferentes iones. En las Figuras 6 y 7 se presenta la distribución de frecuencias de las diferentes aguas naturales de la Cuenca del Oriental con respecto a su conductividad eléctrica (en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y con respecto a la concentración catiónica (en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ).

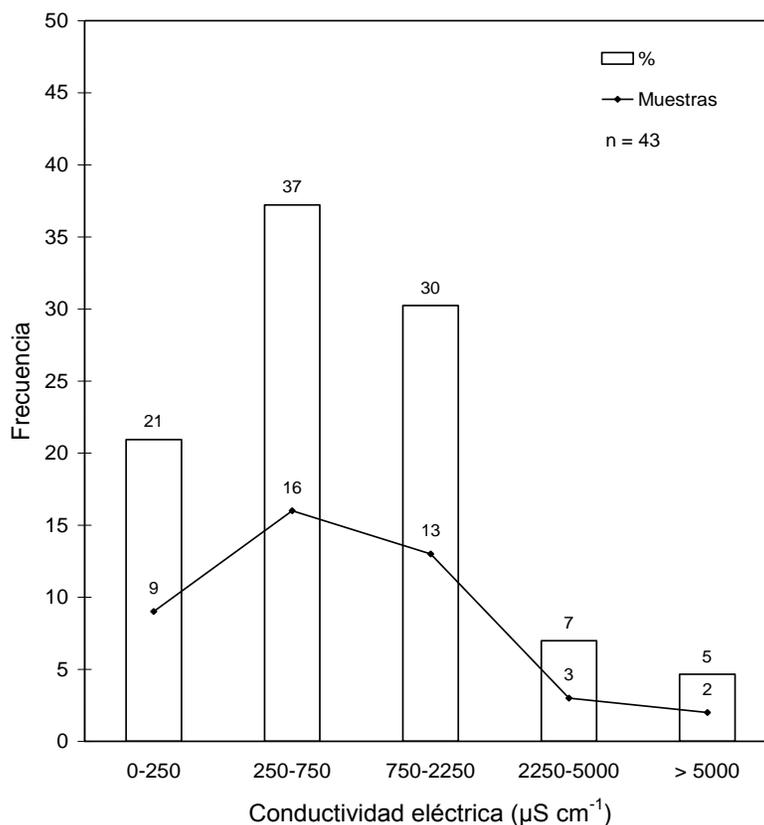


Figura 6. Distribución de frecuencias de los valores de la conductividad eléctrica de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

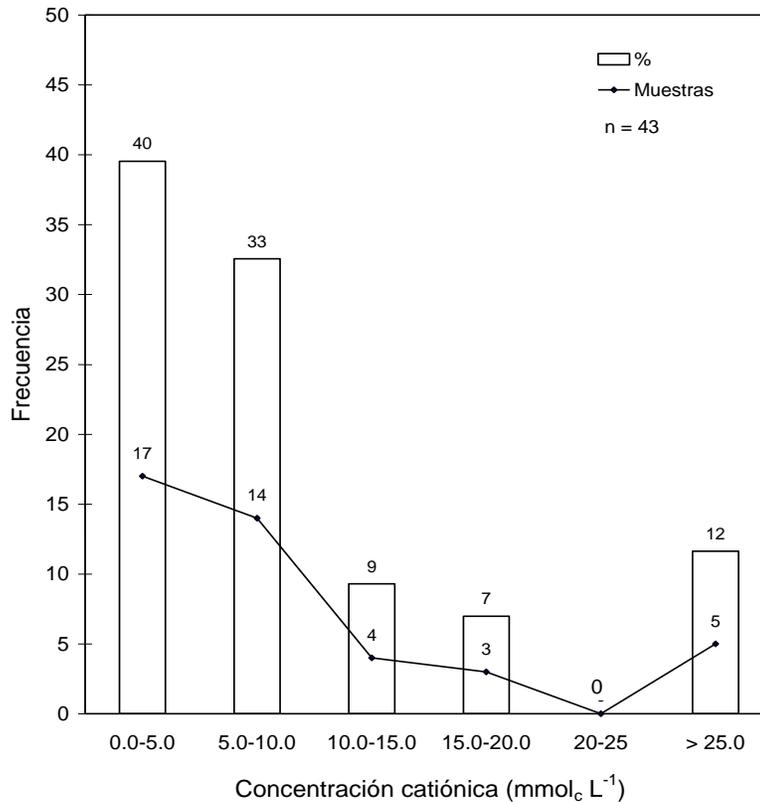


Figura 7. Distribución de frecuencias de los valores de la concentración de cationes de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

De acuerdo con los valores de la conductividad eléctrica establecidos en el diagrama de Richards (1990) para considerar la calidad de las aguas de riego, las aguas naturales que riegan los diferentes cultivos agrícolas que se explotan en la Cuenca del Oriental, se clasificaron como sigue: 1. Aguas con conductividad eléctrica de 0-250  $\mu\text{S cm}^{-1}$  o C1, en nueve muestras; 2. Aguas con conductividad eléctrica de 250-750  $\mu\text{S cm}^{-1}$  o C2, en 16 muestras; 3. Aguas con conductividad eléctrica de 750-2250  $\mu\text{S cm}^{-1}$  o C3, en 13 muestras; 4. Aguas con conductividad eléctrica de 2250-5000  $\mu\text{S cm}^{-1}$  o C4, en tres muestras; 5. Aguas con conductividad eléctrica > 5000  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , en dos muestras.

Por último, de acuerdo con los rangos de los valores de cationes (en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>) las aguas naturales que riegan la Cuenca del Oriental se clasificaron como sigue: 1.

Aguas con concentración de 0.0-5.0 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, en 17 muestras; 2. Aguas con concentración de 5.0-10.0 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, en 14 muestras; 3. Aguas con concentración de 10.0-15.0 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, en cuatro muestras; 4. Aguas con concentración de 15.0-20.0 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, en tres muestras; 5. Aguas con concentración > 25.0 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, en cinco muestras.

#### 7.1.4 Relación entre las conductividades eléctricas determinadas experimentalmente y las determinadas teóricamente

Cuando se investigan soluciones salinas, ya sean en aguas naturales, aguas de los suelos, aguas freáticas y aguas subterráneas, se recomienda medir la conductividad eléctrica de estas soluciones, expresada en μS cm<sup>-1</sup>.

Cuando se quiere determinar la concentración de sales solubles en las aguas superficiales y subterráneas, a través de mediciones de la conductividad eléctrica de las soluciones, para este propósito se cuenta con las relaciones funcionales: mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> =  $f\alpha$  CE, y mg L<sup>-1</sup> =  $f\alpha$  CE. Cuando se determina la concentración de sales expresada en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, la conductividad eléctrica depende del número de iones en solución; en cambio, cuando es necesario determinar los miligramos por litro o partes por millón (mg L<sup>-1</sup> o ppm), la conductividad eléctrica depende del número de partículas en la solución y de su peso particular.

Con la finalidad de establecer en qué medida las mediciones experimentales de la conductividad eléctrica, para el caso particular de las aguas naturales de la Cuenca del Oriental, se encuentran en correspondencia con los valores teóricos de la conductividad eléctrica de estas mismas aguas, se procedió a establecer la relación funcional  $CE_{\text{Teórica}} = f\alpha CE_{\text{Experimental}}$ . Para este efecto se calculó la conductividad eléctrica teórica en μS cm<sup>-1</sup> para cada ión existente en las diferentes muestras de agua, de acuerdo con lo establecido por Eaton *et al.* (1995).

La Figura 8 permite concluir que las determinaciones experimentales de la conductividad eléctrica de las muestras de agua, fueron correctamente determinadas.

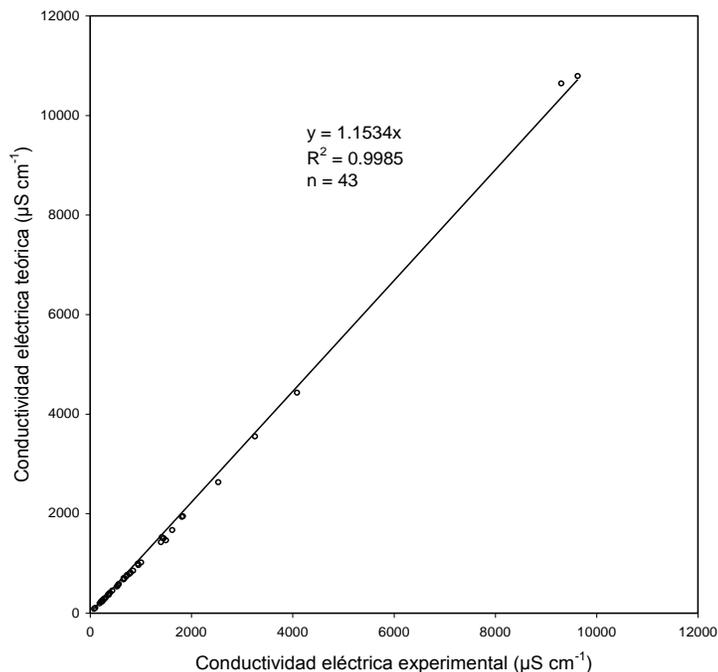


Figura 8. Relación funcional entre la conductividad eléctrica teórica y la experimental, en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

Por último, es necesario mencionar que las sales solubles que se encuentran en las soluciones acuosas de las aguas naturales de la Cuenca del Oriental, en sus formas disociadas están formando diferentes iones independientes. Los fenómenos de disociación ocurren conforme a las leyes de disociación electrolítica.

Una conclusión de importancia relevante de la relación funcional es que:  $CE_{\text{Teórica}} = f_a CE_{\text{Experimental}}$ . Se debe considerar que en las soluciones acuosas siempre se debe mantener la electroneutralidad, lo cual quiere decir que la concentración de cationes y de aniones, cuando se expresan en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ , deben ser aproximadamente iguales. Es así que los valores de la conductividad eléctrica de las más variadas

soluciones salinas son proporcionales a las concentraciones iónicas de estas mismas soluciones.

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

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

En la Figura 9 se presenta la relación funcional entre las concentraciones de las sales solubles de las aguas naturales y sus valores correspondientes de la conductividad eléctrica:  $\text{mg L}^{-1} = f\alpha \text{ CE}$ . El valor de la pendiente ( $\alpha$ ) encontrada es de 0.6826, que corresponde a aguas con una concentración considerable de iones bicarbonato.

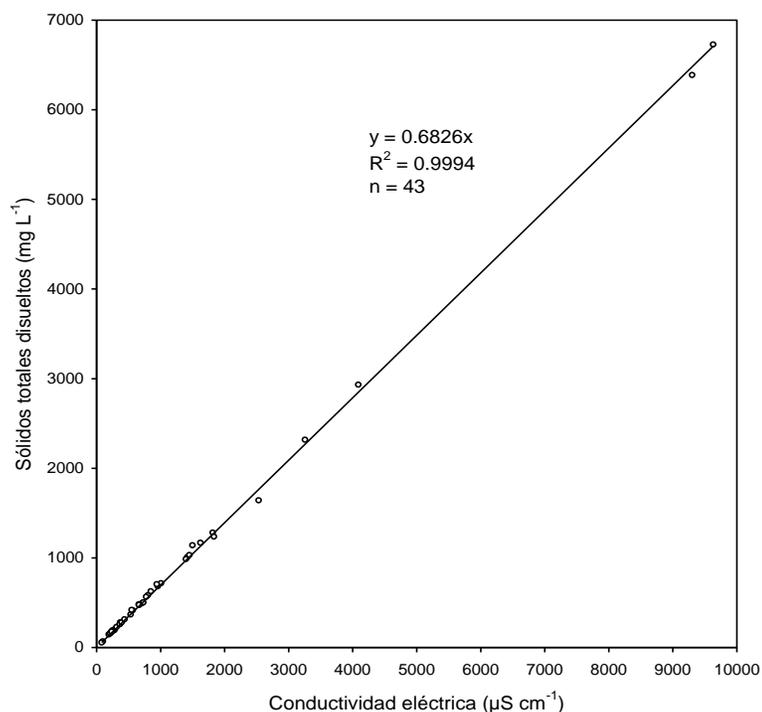


Figura 9. Concentración de sales expresadas en  $\text{mg L}^{-1}$  y su relación con la conductividad eléctrica en  $\mu\text{S cm}^{-1}$  de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

#### 7.1.6 Relación de la suma de cationes (en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) con la conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$ )

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

1990; Eaton *et al.*, 1995). En la Figura 10 se presentan los valores de la relación funcional  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1} = f_a \text{CE}$ , para cationes de las aguas naturales de la Cuenca del Oriental. El valor de la pendiente es de 0.0099.

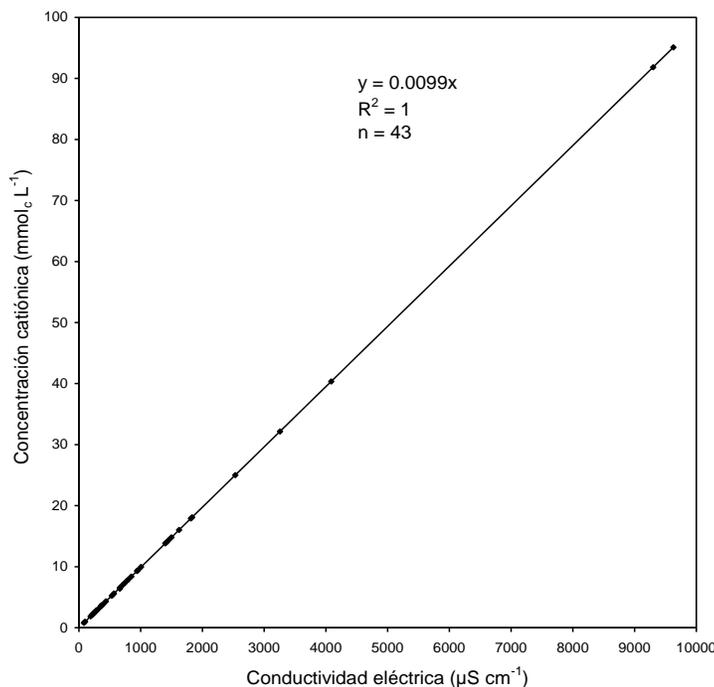


Figura 10. Relación de la suma de cationes en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  con la conductividad eléctrica en  $\mu\text{S cm}^{-1}$  de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

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

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

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

El movimiento neto de las moléculas del disolvente a través de las membranas semipermeables, desde el disolvente puro o desde la disolución diluida, hasta la disolución más concentrada, recibe el nombre de ósmosis. La presión osmótica ( $\pi$ ), de una solución es la presión que se requiere para detener la ósmosis; ésta se expresa en atmósferas, y está formulada teóricamente por:

$$\pi = cRT$$

Donde:

T = Temperatura absoluta (K)

c = Molaridad de la solución ( $\text{mol L}^{-1}$ )

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

La presión osmótica de las soluciones acuosas de las aguas naturales también se puede determinar experimentalmente de acuerdo con:

$$\text{STD} = 0.6826 \text{ CE} \quad \text{y} \quad \pi = 0.00042 \text{ CE}$$

$$\pi = 0.00042/0.6826 \text{ STD}$$

Donde:

STD =  $\text{mg L}^{-1}$  de solutos en el agua.

0.6826 = Pendiente de la recta que se obtiene numéricamente al relacionar  $STD = f_a CE$  en una población de muestras de agua.

0.00042 = Pendiente de la recta que se determina numéricamente al relacionar  $\pi = f_a CE$ .

CE = Conductividad eléctrica determinada numéricamente en una población de muestras de agua (en  $\mu S cm^{-1}$ ).

$\pi$ = Presión osmótica (en atm) de las soluciones acuosas de esa población de muestras de agua.

El coeficiente 0.00042 se obtiene al relacionar la presión osmótica teórica ( $\pi_{Teórica}$ ) en atm y la conductividad eléctrica en  $\mu S cm^{-1}$ ,  $\pi_{Teórica} = f_a CE$  (Figura 11).

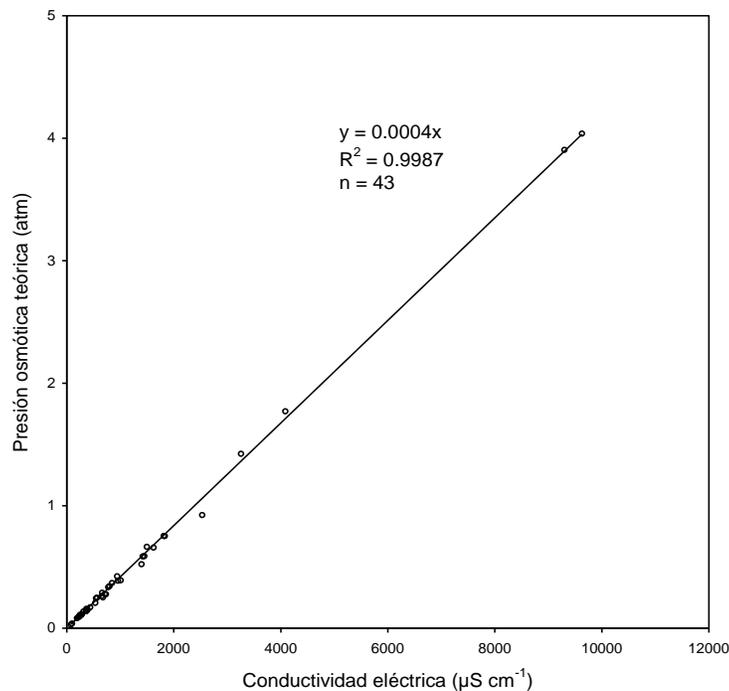


Figura 11. Relación entre la  $\pi_{Teórica}$  en atm y la conductividad eléctrica en  $\mu S cm^{-1}$  de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

En la Figura 12 se presenta la relación de la presión osmótica teórica ( $\pi_{\text{Teórica}}$ ) con la presión osmótica experimental ( $\pi_{\text{Experimental}}$ ). El valor numérico de la pendiente de la relación funcional  $\pi_{\text{Teórica}} = f a \pi_{\text{Experimental}}$  es de 0.907, valor que corresponde a soluciones del tipo bicarbonatado (Richards, 1990; Ramírez, 1988; Velázquez, 2001).

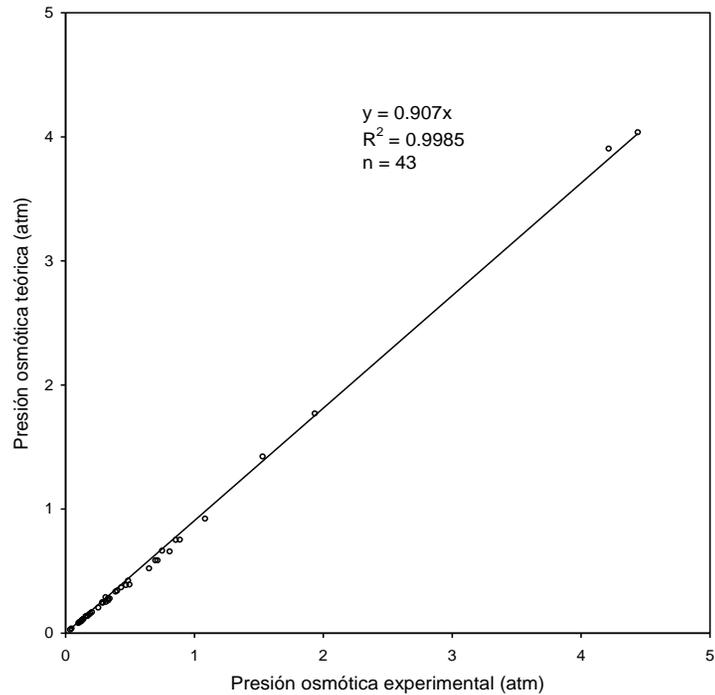


Figura 12. Relación entre la  $\pi_{\text{Teórica}}$  y la  $\pi_{\text{Experimental}}$  en atm de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

#### 7.1.8 Relación entre la concentración iónica ( $\text{mmol-ion L}^{-1}$ ) y la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )

Debido a que las mediciones de la presión osmótica se llevan a cabo a temperaturas constantes, la concentración de sales disociadas se expresa en unidades de molaridad. Y al igual que la elevación del punto de ebullición, el abatimiento del punto de congelación, la disminución de la presión de vapor y la presión osmótica,

esta relación es directamente proporcional a la concentración de la solución, cuando ésta se expresa como conductividad eléctrica en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . Esto es lo que debe esperarse, ya que todas las propiedades coligativas de las soluciones, incluyéndose aquí obviamente la presión osmótica, dependen del número de partículas disueltas en la solución.

En la Figura 13 se presenta la relación de la concentración iónica con la conductividad eléctrica de las aguas naturales que se utilizan para riego en la Cuenca del Oriental, cuyo coeficiente  $\alpha = 0.0171$  permite estimar sus presiones osmóticas con base en la conductividad eléctrica.

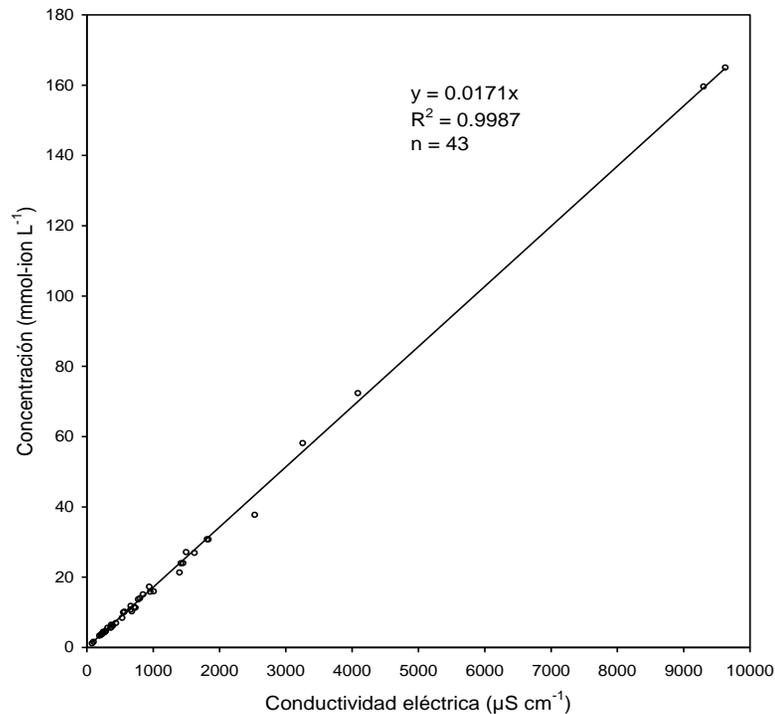


Figura 13. Relación entre los  $\text{mmol-ion L}^{-1}$  y la conductividad eléctrica en  $\mu\text{S cm}^{-1}$  de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

### 7.1.9 Clasificación de las aguas que riegan los suelos de la Cuenca del Oriental, de acuerdo con la relación de adsorción de sodio (RAS)

La presencia de altos niveles de iones de sodio con respecto a las concentraciones de iones de calcio y de magnesio en las soluciones de los suelos, se considera peligrosa ya que en estos suelos tienden a presentarse el fenómeno de deterioro de las propiedades físicas de los suelos y efectos de toxicidad en los cultivos, debido a las grandes cantidades de iones de sodio en las soluciones de los suelos. El deterioro de las propiedades físicas de los suelos se debe también a los altos niveles de sodio intercambiable que se encuentran en los suelos.

También se ha considerado que la sodicidad de un suelo se refiere a los iones de sodio ( $\text{Na}^+$ ), en particular en ausencia del efecto osmótico que es característico de la salinidad. La sodicidad se estima mediante dos criterios que son los más comunes: el porcentaje de sodio intercambiable y la relación de adsorción de sodio.

La sodicidad de un suelo se encuentra determinada por el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) ya que éste se refiere a la cantidad de cargas negativas que están neutralizadas con iones de sodio (RAS) en el agua de riego. El porcentaje de sodio intercambiable puede ser estimado mediante el conocimiento de la relación de adsorción de sodio (RAS) en el agua de riego.

Si el porcentaje de sodio intercambiable excede de 15, entonces el suelo es considerado sódico (Richards, 1990); sin embargo, se tienen suelos que de acuerdo a su mineralogía, con un porcentaje de sodio intercambiable de 6 son considerados sódicos y de 15 ó  $> 15$  son considerados suelos fuertemente sódicos (Läuchli y Epstein, 1990).

Se debe señalar, que el laboratorio de salinidad de los Estados Unidos (Richards, 1990) ha considerado que el comportamiento del ion magnesio, en lo que concierne a la capacidad de neutralizar cargas negativas en el complejo de intercambio

catiónico de los suelos, es semejante al comportamiento del ion calcio en la fase adsorbida de los suelos. Por esta razón para el cálculo de la RAS se incluye al ion

magnesio; modificando así la ecuación original 
$$RAS = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{C_{Ca^{2+}}}}$$
.

Como ya se ha señalado anteriormente, que las diferentes aguas naturales, varían en sus composiciones iónicas y en sus aniones, por lo que estas aguas poseen distintos regímenes físico-químicos. Aquí destacan las aguas que tienen cantidades considerables de iones bicarbonato, como muchas que atraviesan grandes espesores de cenizas basálticas y depósitos pumíticos, como los rellenos de los acuíferos de la Cuenca del Oriental (Yáñez y García, 1982).

De acuerdo con lo que se señala aquí, se estima que los contenidos de los iones de calcio y de magnesio en las aguas naturales sufren variaciones debido a que estas aguas poseen un régimen físico-químico que tiende a la alcalinidad ( $pH \rightarrow > 7.0$ ).

En estas condiciones los iones bicarbonato se precipitan en forma de calcita. En consecuencia el valor de la relación de adsorción de sodio original o explícita (RAS) tenderá a obtener diferentes valores numéricos, como resultado de la precipitación o solubilización de ciertas fracciones de la calcita. El proceso de precipitación o de solubilización de la calcita está determinado por las constantes de equilibrio de los iones de calcio, carbonatos y bicarbonatos.

En la Figura 14 se presenta la relación de adsorción de sodio ajustada con la relación de adsorción de sodio original o explícita ( $RAS_{aj}$ -RAS) y en la Figura 15 la relación de adsorción de sodio corregida con la relación de adsorción de sodio original ( $RAS^0$ -RAS). Con los valores numéricos de los diferentes RAS aquí calculados, obtenemos diferentes valores de sodio intercambiable (PSI). La determinación de valores extremos de  $PSI_{min}$ - $PSI_{max}$  es muy útil para el manejo de las fuentes de calcio y para mejorar los suelos sódicos mediante la aplicación de diferentes dosis de mejoradores químicos.

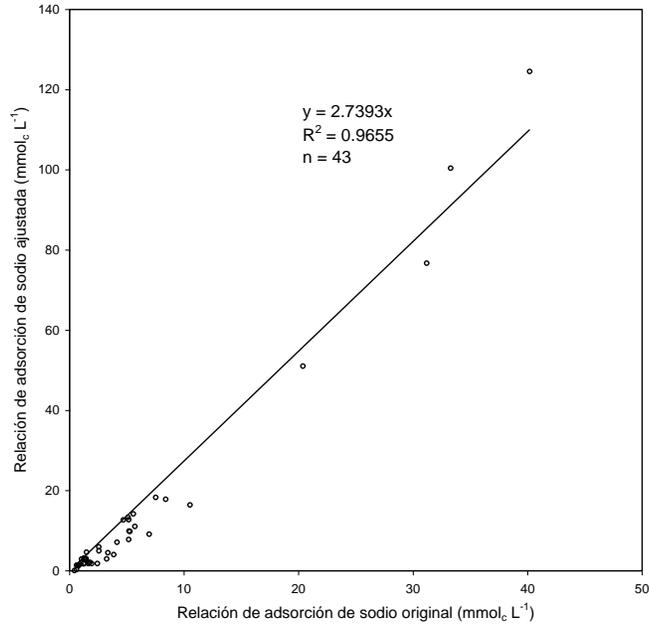


Figura 14. Relación entre los valores de la RAS ajustada y la RAS original de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

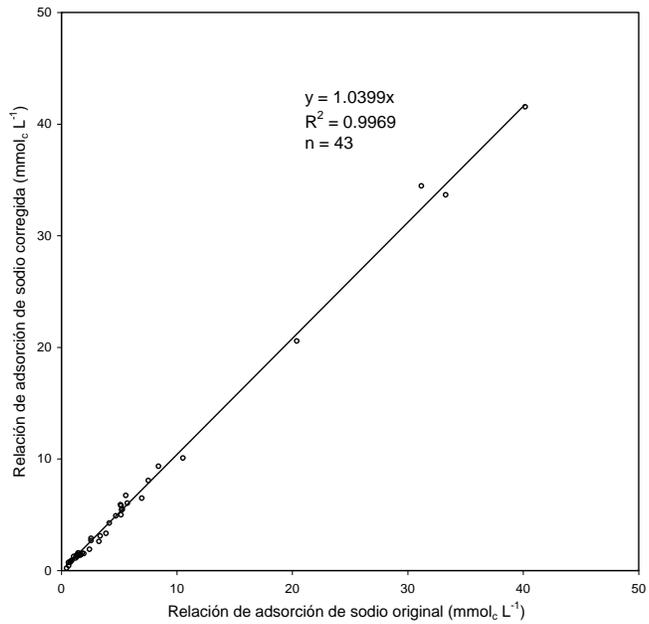


Figura 15. Relación entre los valores de la RAS corregida y la RAS original de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

La Figura 16 ilustra cómo se distribuyeron las aguas de la Cuenca del Oriental, de acuerdo con los valores numéricos de la relación de adsorción de sodio (RAS), en sus tres conceptualizaciones.

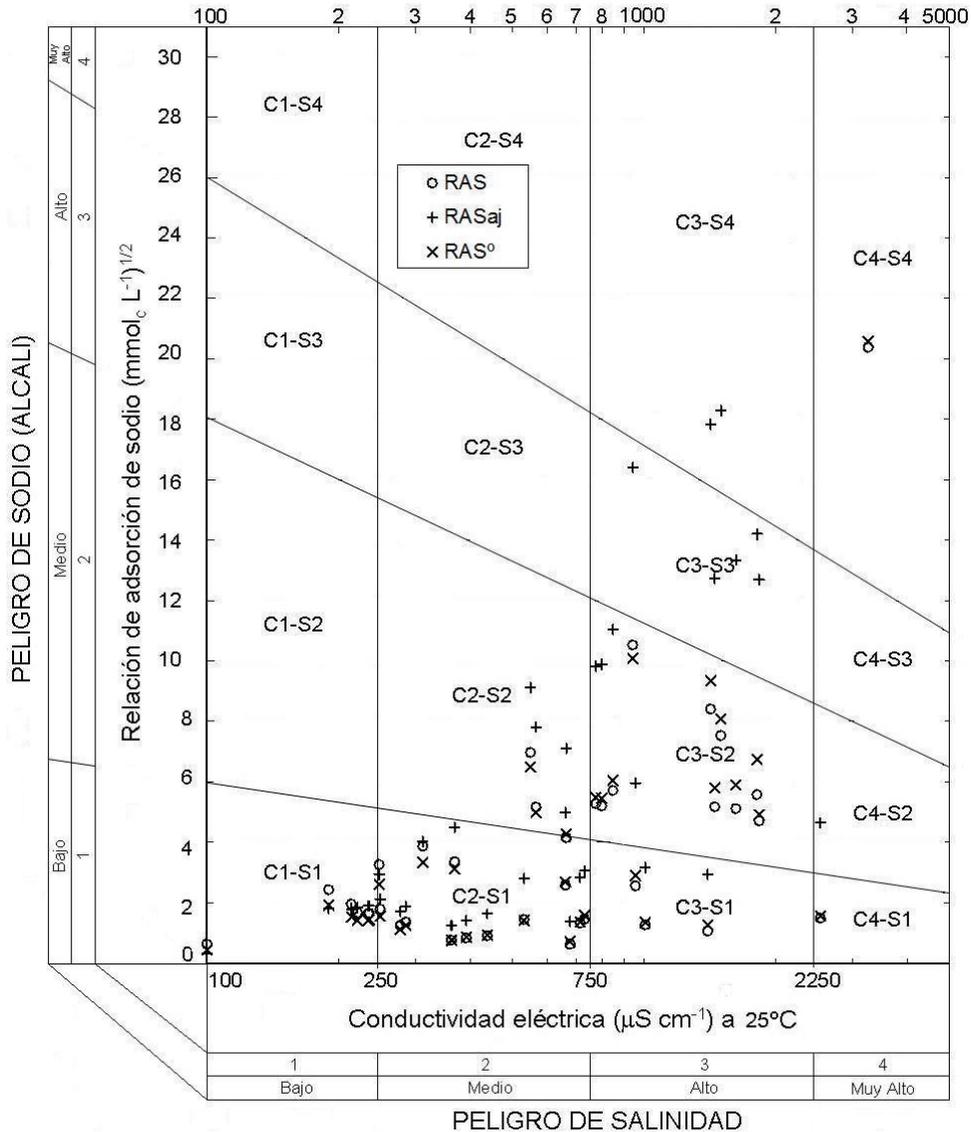


Figura 16. Clasificación de las aguas de la Cuenca del Oriental mediante el diagrama de Richards (1990). Estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

En el Cuadro 11 se presenta la clasificación de las aguas de la Cuenca del Oriental, de acuerdo con sus valores de RAS y CE. Aquí se toman en cuenta las variaciones

en las concentraciones de iones de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), de acuerdo con los procesos de precipitación o disolución de la calcita ( $\text{RAS}_{\text{aj}}$ ).

Cuadro 11. Síntesis de clasificación de las aguas de la Cuenca del Oriental con base en el diagrama de Richards. Estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

Formulaciones de RAS	Clasificación de acuerdo con el diagrama de Richards (1990)									
	C1-S1	C2-S1	C2-S2	C3-S1	C3-S2	C3-S3	C3-S4	C4-S1	C4-S2	C4-S4
RAS										
Muestras	9	16	-	6	7	-	-	1	-	4
$\text{RAS}_{\text{aj}}$										
Muestras	9	14	2	3	3	5	2	-	1	4
$\text{RAS}^{\circ}$										
Muestras	9	16	-	6	7	-	-	1	-	4

#### 7.1.10 Clasificación de las aguas de la Cuenca del Oriental en cuanto al peligro de la disminución de la infiltración

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

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

En la Cuenca del Oriental, en sus planicies y en las estribaciones de los lagos de Totolcingo y de Tepeyahualco, se riega por aspersión. Con este tipo de riego, es más grande la posibilidad de que se propicie el encostramiento de la superficie del suelo cuando se riega con aguas de altos RAS y con elevadas concentraciones de iones bicarbonato.

En la Figura 17 se ilustra la relación RAS-CE de las aguas que riegan la Cuenca del Oriental y su consecuencia sobre la infiltración. Treinta muestras causarán una reducción de ligera a moderada sobre la infiltración, ocho no causarán reducción y sólo cinco causarán una reducción severa.

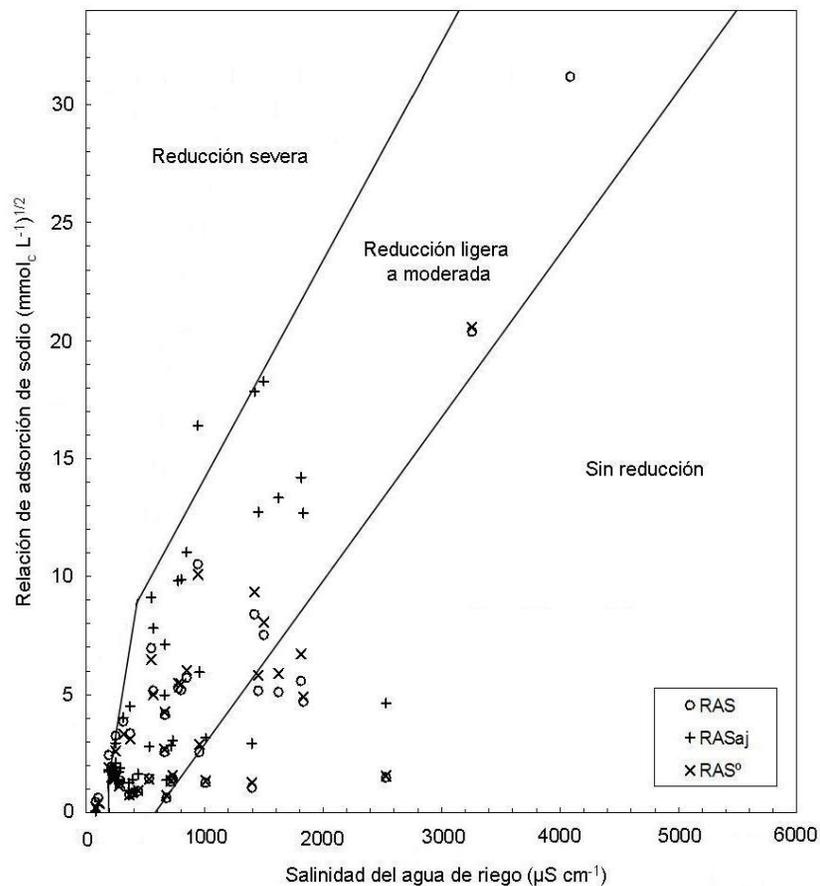


Figura 17. Clasificación de las aguas de la Cuenca del Oriental mediante el diagrama de Ayers y Westcot (1987). Estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

### 7.1.11 Carbonato de sodio residual (CSR) en las aguas de la Cuenca del Oriental

Cuando en el agua de riego el contenido de carbonatos y bicarbonatos es mayor que el contenido de calcio y de magnesio, existe la posibilidad de que se forme carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), debido a que por su alta solubilidad puede permanecer en solución aún después de que han precipitado los carbonatos de calcio y de magnesio. El carbonato de sodio provoca la defloculación del suelo (Wilcox *et al.*, 1954). El índice CSR se calcula con la siguiente ecuación:

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

La Figura 18 ilustra la distribución del CSR en las aguas de la Cuenca del Oriental.

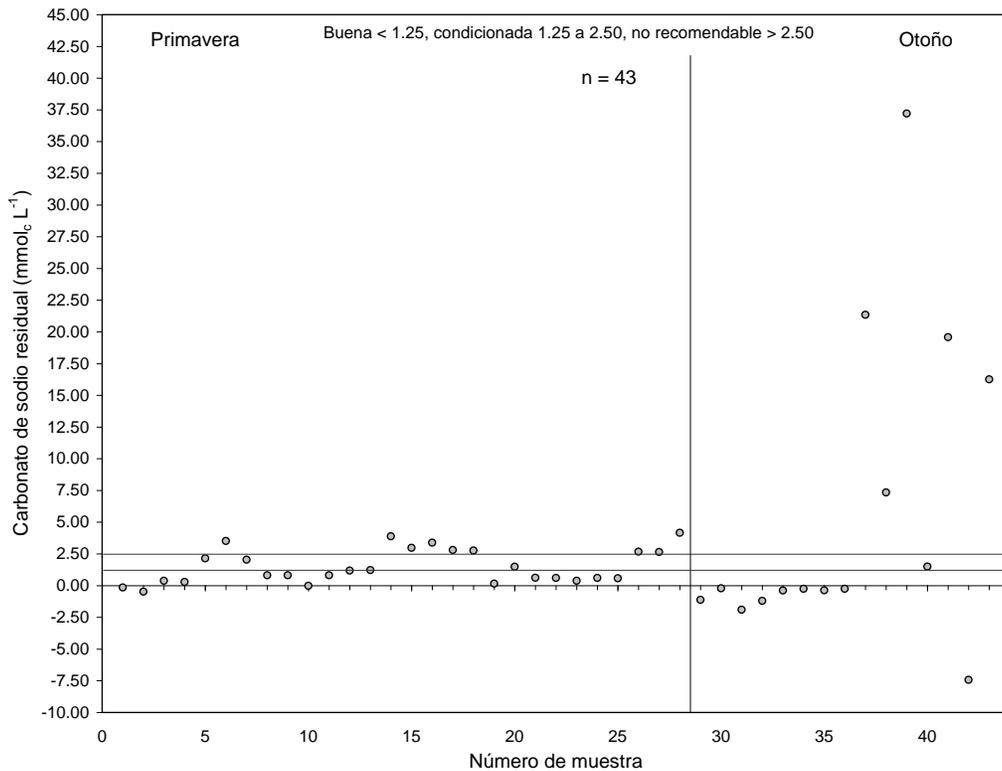


Figura 18. Contenido de carbonato de sodio residual en las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

### 7.1.12 La relación funcional entre el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la relación de adsorción de sodio (RAS)

La posibilidad de predecir la distribución de iones entre la fase soluble y la fase sólida (complejo de intercambio catiónico) es de mucha importancia en el manejo de los suelos salinos, particularmente cuando se refiere a los problemas de sodicidad. La complejidad mineralógica de la fracción arcillosa y de naturaleza multi-iónica de la solución del suelo, hace muy difícil una definición rigurosa de la distribución de los iones en el suelo. Una aproximación a este problema son las ecuaciones de intercambio catiónico.

En el establecimiento de la relación funcional PSI-RAS se utiliza la ley de acción de masas. Como los efectos del ion sodio sobre los sistemas coloidales de los suelos están bien correlacionados, cualquier elevación del peligro potencial de la sodicidad de una agua de riego deberá relacionarse con el porcentaje de sodio intercambiable (PSI); el PSI tendrá que encontrarse en el suelo como consecuencia del riego.

La constante de selectividad iónica de Gapon (K). La ecuación de intercambio catiónico de Gapon se ha utilizado ampliamente en los estudios de salinidad y de sodicidad de los suelos. La expresión original de Gapon para el sistema de intercambio Na-Ca es como sigue:



En donde la concentración de la solución se expresa en  $\text{mmol L}^{-1}$ , y la concentración de iones en la fase adsorbida se expresa en  $\text{mmol}_c/100 \text{ g}$ . Entonces, en condiciones de equilibrio se representa como sigue:

$$K = \frac{X_{\text{Ca}} (\text{Ca}^{2+})^{1/2}}{X_{1/2}\text{Ca} (\text{Na})}$$

Donde K es el coeficiente de selectividad iónica de Gapon.

La relación de iones adsorbidos y de iones en solución, se representa como sigue:

$$\frac{X_{Na}}{X_{\frac{1}{2}Ca}} = K \frac{Na}{\sqrt{Ca^{2+}}}$$

Donde las unidades de K están en  $(\text{mmol L}^{-1})^{-1/2}$ .

El laboratorio de salinidad de los Estados Unidos (Richards, 1990) ha considerado que el ion  $Mg^{2+}$  se comporta en forma similar al ion  $Ca^{2+}$  en la fase adsorbida; ello modifica a la ecuación original de Gapon en la forma siguiente:

$$\frac{X_{Na}}{CIC - X_{Na}} = K RAS \quad \text{y como} \quad PSI = \frac{X_{Na}}{CIC} 100$$

Después de hacer arreglos correspondientes, la ecuación final queda:

$$\frac{PSI}{100 - PSI} = K RAS$$

Al despejar PSI, queda:

$$PSI = \frac{K RAS}{1.0 + K RAS} 100$$

Esta última es la ecuación para calcular el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) de un suelo cuando se conoce la relación de adsorción de sodio (RAS) de una determinada agua de riego en equilibrio y en condiciones de saturación.

En la Figura 19 se presenta la relación funcional PSI-RAS para las aguas de la Cuenca del Oriental, en sus diferentes conceptualizaciones RAS,  $RAS_{aj}$  y  $RAS^{\circ}$ . En

esta relación funcional los valores del coeficiente de selectividad iónica de Gapon fueron:  $K_1 = 0.01000$ ,  $K_2 = 0.01162$  y  $K_3 = 0.01690$ .

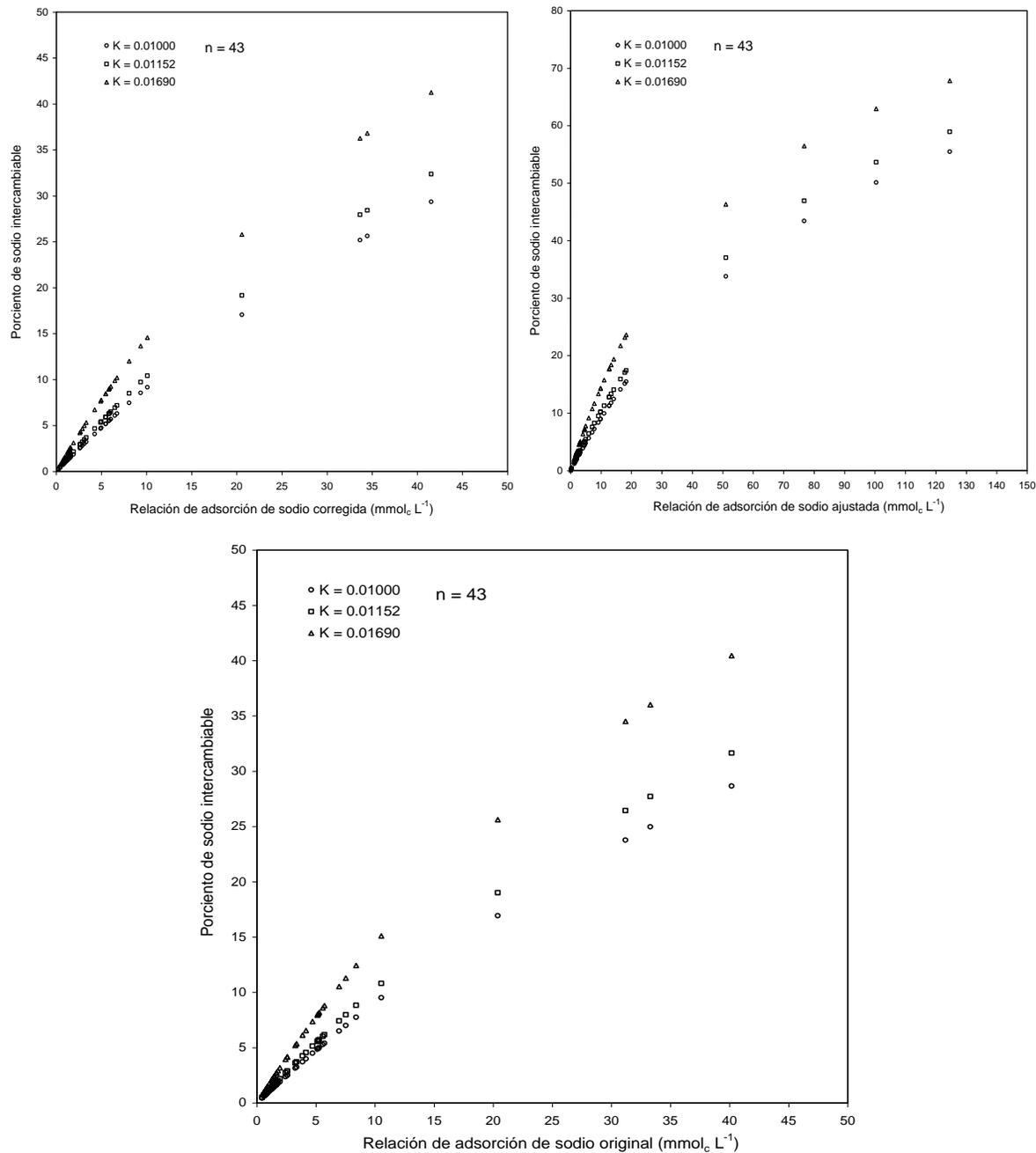


Figura 19. Relación funcional PSI-RAS con base en las distintas formulaciones de la RAS y valores de K, de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

### 7.1.13 Distribución del boro en las aguas de la Cuenca del Oriental

Los límites de tolerancia de los cultivos agrícolas a las concentraciones de boro son: muy sensibles ( $< 0.5 \text{ mg L}^{-1}$ ), sensibles ( $0.5-0.75-1.0 \text{ mg L}^{-1}$ ), 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, 1985).

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). En la Figura 20 se presenta el contenido de boro en las aguas de la Cuenca del Oriental. Los contenidos mayores a  $13 \text{ mg L}^{-1}$  se encuentran en las muestras de la caldera Los Humeros.

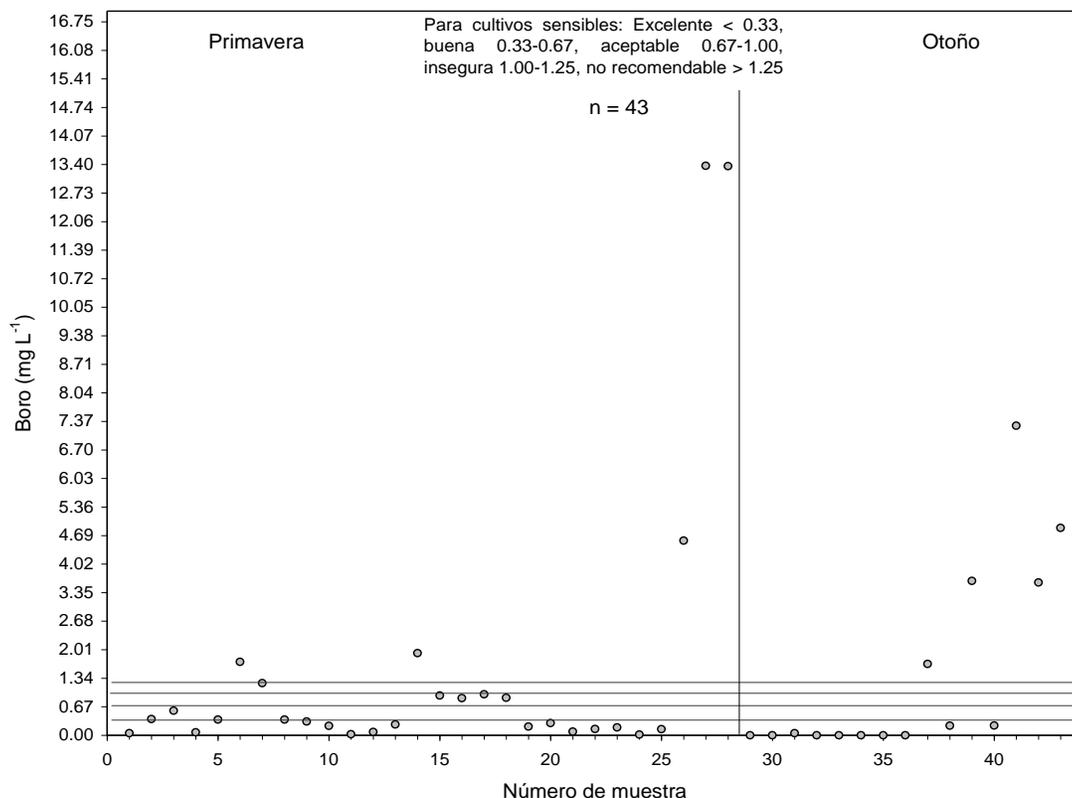


Figura 20. Evaluación del contenido de boro en las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

#### 7.1.14 Contenido de fósforo en las aguas de la Cuenca del Oriental

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

Los fertilizantes fosforados se aplican a los suelos en forma de ortofosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). La absorción del fósforo (P) por las plantas a través de sus raíces se hace en forma de ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ). El contenido de fósforo en las aguas de la Cuenca del Oriental se presenta en la Figura 21. Tres muestras de agua no son aceptables para uso

agrícola y pertenecen a las muestras de la caldera Los Humeros y a la agua freática Las Huertas.

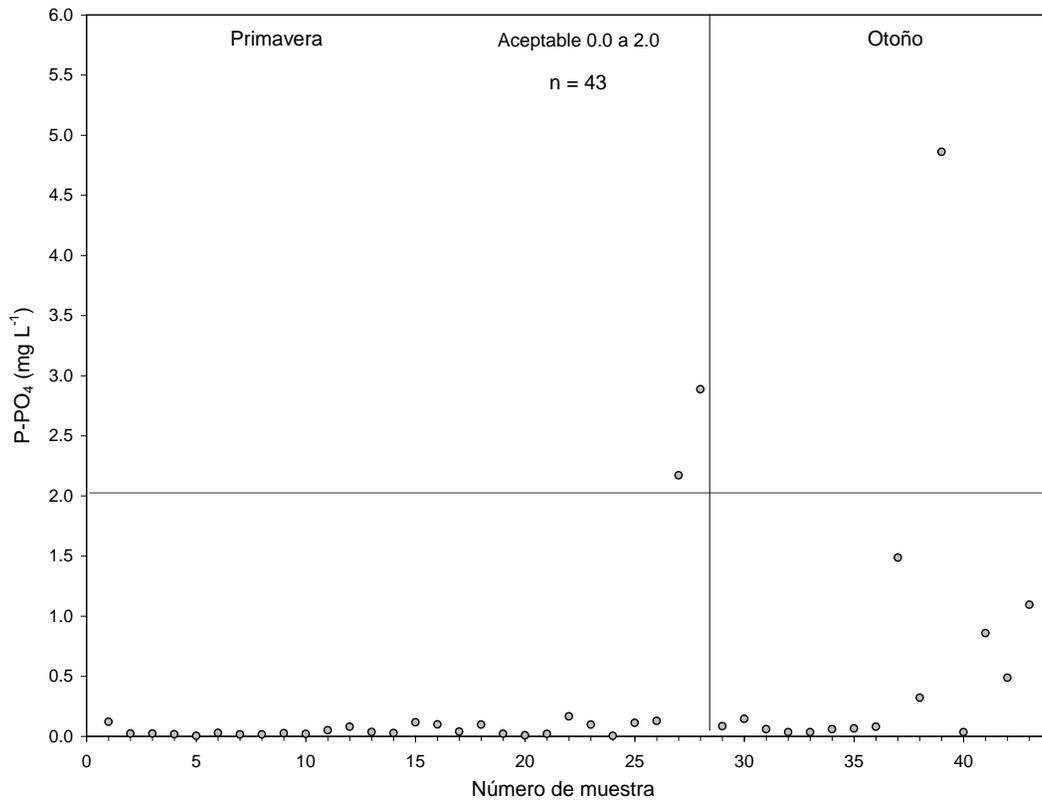


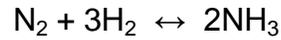
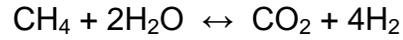
Figura 21. Evaluación del contenido de fósforo en las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

#### 7.1.15 Contenido de nitrógeno en las aguas de la Cuenca del Oriental

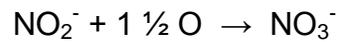
Se determinó el contenido de  $N-NO_3^-$  en las aguas superficiales y subterráneas de la Cuenca del Oriental, sobre todo porque las aguas subterráneas podrían tener alguna influencia de los procesos volcánicos que ocurrieron en el Pli-Pleistoceno.

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

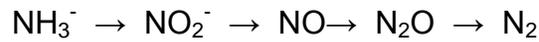
Obtención del amoniaco:



Oxidación del amonio:



Reducción de nitratos:



En la Figura 22 se presentan las concentraciones de  $\text{N-NO}_3^-$  en las aguas de la Cuenca del Oriental, evaluadas solamente en el otoño del 2008.

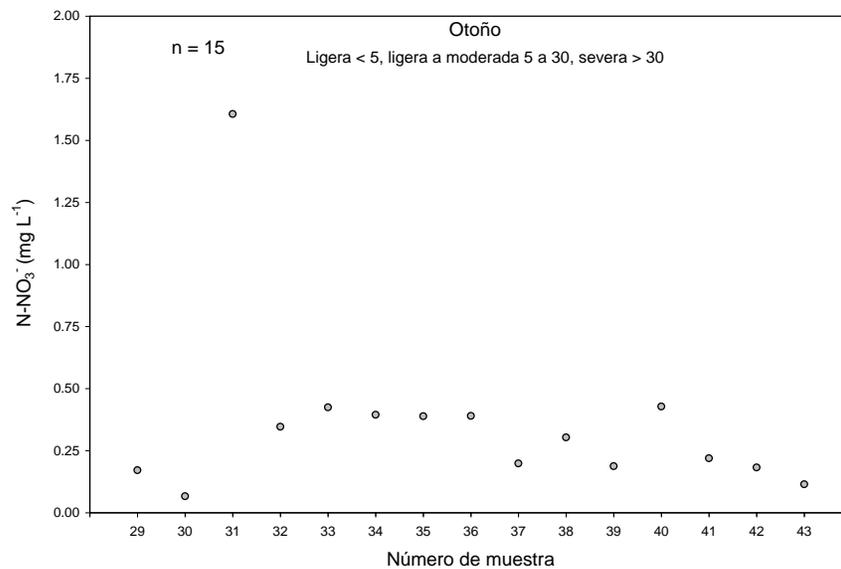


Figura 22. Evaluación del contenido de nitrógeno en las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Otoño 2008.

## 7.2 Axalapazcos, maars o lagos cráter de la Cuenca del Oriental

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

### 7.2.1 Localización geográfica de los lagos cráter

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

En el Cuadro 12 se presentan las coordenadas y altimetría de los lagos cráter. Estas coordenadas y altimetría son las que consignó Álvarez (1950) en su trabajo “Contribución al conocimiento de los peces de la región de los Llanos, estado de Puebla (México)” y los que el autor de este trabajo levantó durante los recorridos de primavera y otoño 2008, para la toma de muestras de agua.

Cuadro 12. Localización de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

Nombre	Coordenadas geográficas		Altitud media (m)	
	Álvarez (1950)	Autor (2008)	Álvarez (1950)	Autor (2008)
	Long. O / Lat. N	Long. O / Lat. N	(espejo del agua)	
Alchichica	97° 24' 00"	97° 23' 822"	2345	2332
	19° 24' 13"	19° 24' 547"		
Atexcac	97° 21' 19"	97° 20' 857"	2510	2355
	19° 20' 13"	19° 20' 194"		
Quechulac	97° 21' 19"	97° 22' 667"	2395	2337
	19° 20' 13"	19° 22' 667"		
La Preciosa	97° 22' 27"	97° 23' 822"	2365	2338
	19° 21' 23"	19° 22' 480"		
Aljojuca	97° 33' 14"	97° 32' 294"	2390	2356
	19° 05' 00"	19° 05' 596"		
San Miguel Tecuitlapa	97° 34' 00"	97° 32' 615"	2390	2359
	19° 07' 09"	19° 07' 365"		

En lo que se refiere a los valores altimétricos, de los distintos lagos cráter en su espejo de agua, que el autor levantó, a este respecto se debe mencionar que prácticamente los niveles del espejo de agua en los lagos cráter se encuentran a la misma altura con una diferencia de  $\pm 27$  m. Esta particularidad que se señala aquí es muy importante ya que esto hace presuponer que hacia los lagos cráter, en una menor o mayor cantidad se filtran diferentes volúmenes de agua de los acuíferos adyacentes. La velocidad de los procesos de filtración va a depender de las cargas piezométricas de estos acuíferos circunvecinos y de la consolidación y sellamiento de los materiales que se encuentran en las partes contiguas a los conos volcánicos de los lagos cráter.

Algunas características de los lagos cráter que se encuentran en la Cuenca del Oriental (Cuadro 13), de acuerdo con Yáñez y García (1982), son:

Cuadro 13. Características principales de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

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

Yáñez y García (1982) en un reporte intitulado “Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz”, sobre las características generales de las aguas de los lagos cráter señalan lo siguiente:

1. Las aguas de los lagos cráter de San Miguel Tecuitlapa y de Aljojuca son de origen meteórico, y no presentan relación alguna con las aguas termales ascendentes ya que el nivel del agua corresponde al nivel freático de los acuíferos someros de la región.
2. Las aguas de los lagos cráter de Quechulac y de La Preciosa son una evidencia muy clara de la interfase entre las aguas termales y las aguas meteóricas, porque la recarga de agua a los acuíferos donde estos lagos cráter están ubicados proviene de la sierra de origen volcánico compuesta por los volcanes Cofre de Perote y Pico de Orizaba. Quechulac se alimenta únicamente con aguas de origen meteórico porque está situada muy cerca de donde se inicia la recarga al valle. En cambio, las aguas de La Preciosa, situada al pie de la Sierra de Techachalco, presenta ya una mezcla de agua de origen termal y meteórico, por estar dentro de la posible zona de influencia del termalismo a profundidad.

3. Las aguas del lago cráter de Atexcac son de origen termal y tienen poca influencia de aguas meteóricas y presentan un alto contenido de boro, cloruros y sílice; y aunque el nivel del agua del lago cráter corresponde al nivel freático de la región, las características de estas aguas son diferentes a las aguas de los acuíferos del área. Esto se debe a la relación directa que guarda el agua con las estructuras volcánicas que aún manifiestan actividad fumarólica.
4. Finalmente, las aguas del lago cráter de Alchichica acusan un alto contenido de boro, cloruro, y ausencia total de sílice, esto indica que se trata de aguas que están muy influenciadas por aguas termales ascendentes ya frías; al parecer, la ausencia de sílice se debe principalmente a su precipitación durante la migración de estas aguas termales hacia la superficie.

#### 7.2.2 Composición iónica de las aguas

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

#### 7.2.3 Distribución de los cationes y aniones en las aguas

Con el propósito de conocer las características físico-químicas de las aguas de los diferentes lagos cráter que se localizan en la Cuenca del Oriental tales como Alchichica, Quechulac, La Preciosa, Atexcac, San Miguel Tecuitlapa y Aljojuca; se tomaron muestras de agua en dos periodos, primavera y otoño 2008. Aquí se debe mencionar que las aguas de los lagos cráter de Quechulac, La Preciosa y Aljojuca son de baja concentración. También es necesario señalar que en las áreas cercanas a estos lagos cráter se tienen pozos profundos que riegan diferentes cultivos. En los

últimos años se ha observado que los niveles de los espejos de agua de los lagos cráter de Quechulac, La Preciosa y de Aljojuca están disminuyendo sensiblemente debiéndose este descenso del espejo del agua a la extracción de agua de pozos profundos que se encuentran localizados en las cercanías de estos lagos cráter.

Por considerar, que las aguas de los lagos cráter de Quechulac, La Preciosa y de Aljojuca tienen algún contacto con las aguas subterráneas que se tienen en las diferentes zonas de esta Cuenca del Oriental, aquí en este estudio, se caracterizaron estas aguas desde la perspectiva del uso agrícola. Aunque esta caracterización, también se extendió a los lagos cráter de Alchichica y Atexcac con el propósito de establecer comparaciones extremas de los distintos índices de evaluación de las diferentes aguas de diverso origen que se utilizan en el riego de cultivos agrícolas en general.

Las aguas de los lagos cráter de Quechulac, La Preciosa y Aljojuca son de baja concentración iónica siendo estas como sigue: Quechulac igual a  $559.0 \text{ mg L}^{-1}$ , La Preciosa  $1400.0 \text{ mg L}^{-1}$  y Aljojuca  $895.0 \text{ mg L}^{-1}$ . Las soluciones de agua de estos lagos cráter tienen de alguna manera una relación de continuidad con las aguas de los acuíferos adyacentes (Yáñez y García, 1982). Las aguas del lago cráter San Miguel Tecuitlapa son de muy poco volumen  $< 0.35 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . Debido a la explotación de aguas subterráneas, los volúmenes del lago cráter de San Miguel Tecuitlapa ya tienden a desaparecer. Las aguas de los lagos cráter de Alchichica y de Atexcac son de alta concentración y estas aguas guardan una relación con los procesos hidrotermales. Las concentraciones de las aguas de los lagos cráter de Alchichica y de Atexcac son: Alchichica igual a  $8204.0 \text{ mg L}^{-1}$  y Atexcac  $7059.0 \text{ mg L}^{-1}$ .

En la Figura 23 se presenta la distribución iónica de los lagos cráter.

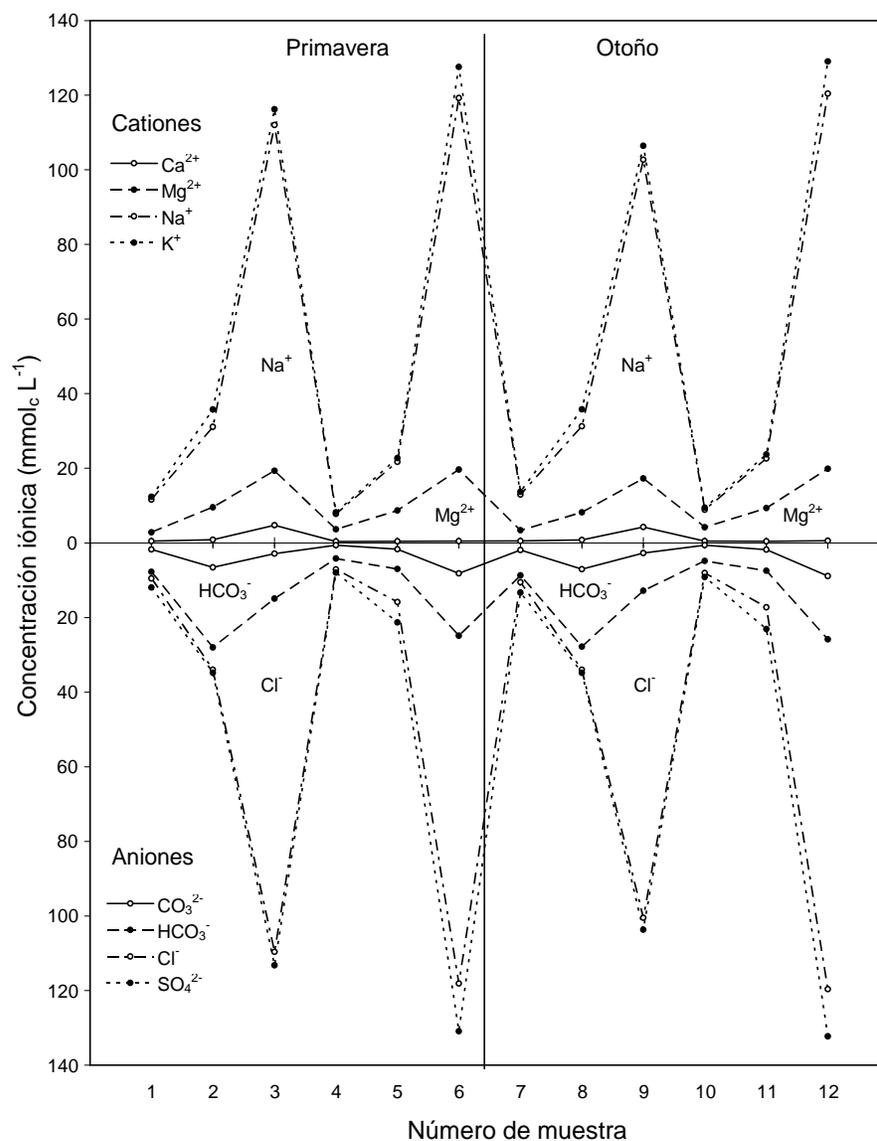


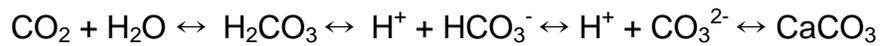
Figura 23. Diagrama de distribución iónica de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

#### 7.2.4 El sistema carbonato en las aguas de los lagos cráter

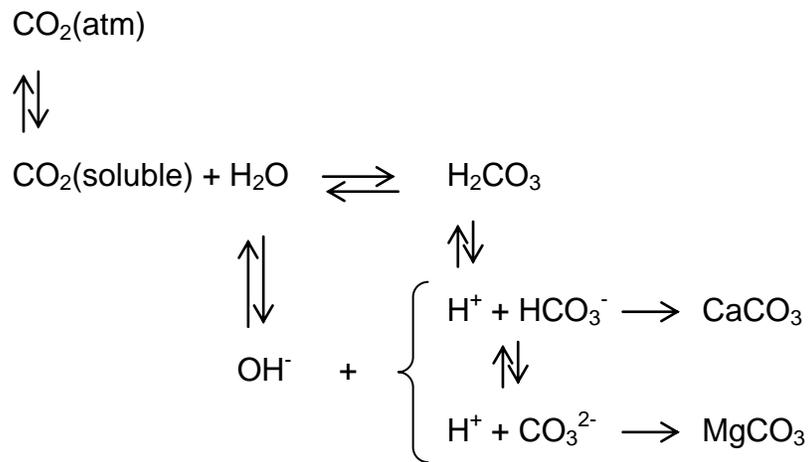
El régimen físico-químico alcalino de las aguas de los diferentes lagos cráter se mantiene debido a los procesos de hidrólisis. El pH de los lagos cráter es el siguiente: Alchichica igual a 9.2, La Preciosa 9.1, Quechulac 9.0, Atexcac 9.2, Tecuitlapa 9.5 y Aljojuca igual a 9.2. El régimen físico-químico alcalino de los lagos

cráter de acuerdo con Ramírez y Novelo (1984) es el siguiente: Alchichica igual a 9.0, La Preciosa 9.0, Quechulac 8.3, Atexcac 8.3, Tecuitlapa 8.5 y Aljojuca igual a 8.4.

El sistema carbonato de las aguas se representa de acuerdo con el siguiente esquema:



El sistema carbonato se estabiliza en concordancia con lo siguiente: por un lado con la participación del  $\text{CO}_2$  de la atmósfera, y por el otro lado con los carbonatos de calcio y de magnesio. Esquemáticamente este sistema lo podemos representar con una serie de reacciones interrelacionadas y sucesivos de estudios reversibles.



Cada paso de este sistema se caracteriza por una determinada constante de equilibrio.

El bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) se solubiliza en las distintas aguas naturales en diferentes cantidades y de acuerdo con la siguiente ecuación:



El ácido carbónico posteriormente se disocia, formando en primer lugar al ion bicarbonato, y después al ion carbonato:



La entrada de  $\text{CO}_2$  a las diferentes aguas tiene ocurrencia de acuerdo con los siguientes procesos:

1. Ingreso de  $\text{CO}_2$  desde la atmósfera
2. Respiración de todos los organismos
3. Descomposición de las sustancias orgánicas
4. Emanaciones volcánicas (freatomagmatismo)
5. Solubilización de los carbonatos

La salida de  $\text{CO}_2$  de las aguas naturales se debe a los siguientes procesos:

1. Consumo por el plancton durante los procesos de la fotosíntesis
2. Salida a la atmósfera
3. Precipitación de carbonatos de calcio y de magnesio

Sobre el alto contenido de carbonatos y de bicarbonatos en todas las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental se debe mencionar que una cantidad inicial muy considerable de carbonatos y bicarbonatos en los inicios de las explosiones que formaron los conos volcánicos, se originó en las soluciones freatomagmáticas y en las soluciones hidrotermales, en la interacción con las calizas y en su ascenso hacia la superficie del cono volcánico.

### 7.2.5 Composición de las sales hipotéticas de los lagos cráter

En las Figuras 24 y 25 se presentan las composiciones iónicas, expresadas en porcentaje de  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ , de cationes y de aniones de los diferentes lagos cráter. Para mostrar la diferencia de las composiciones iónicas, en sus diferentes concentraciones, de los lagos cráter y a su vez señalar que las aguas continentales distan de ser equivalentes en sus relaciones iónicas de las aguas oceánicas, en las Figuras 24 y 25, se presentan de manera esquemática la comparación, en lo que se refiere a la composición iónica, de las aguas de los diferentes lagos cráter con las aguas oceánicas. Los datos de concentración iónica de las aguas oceánicas o aguas de mar se tomaron de Shishkina (1974).

Como resultado de la composición de las aguas de los diferentes lagos cráter y del océano, se deduce que las aguas continentales son ricas en bicarbonatos y carbonatos. En las aguas oceánicas los contenidos de bicarbonatos y carbonatos son pequeños. Esto se debe al sistema carbonato y al régimen físico-químico débilmente alcalino de las aguas oceánicas.

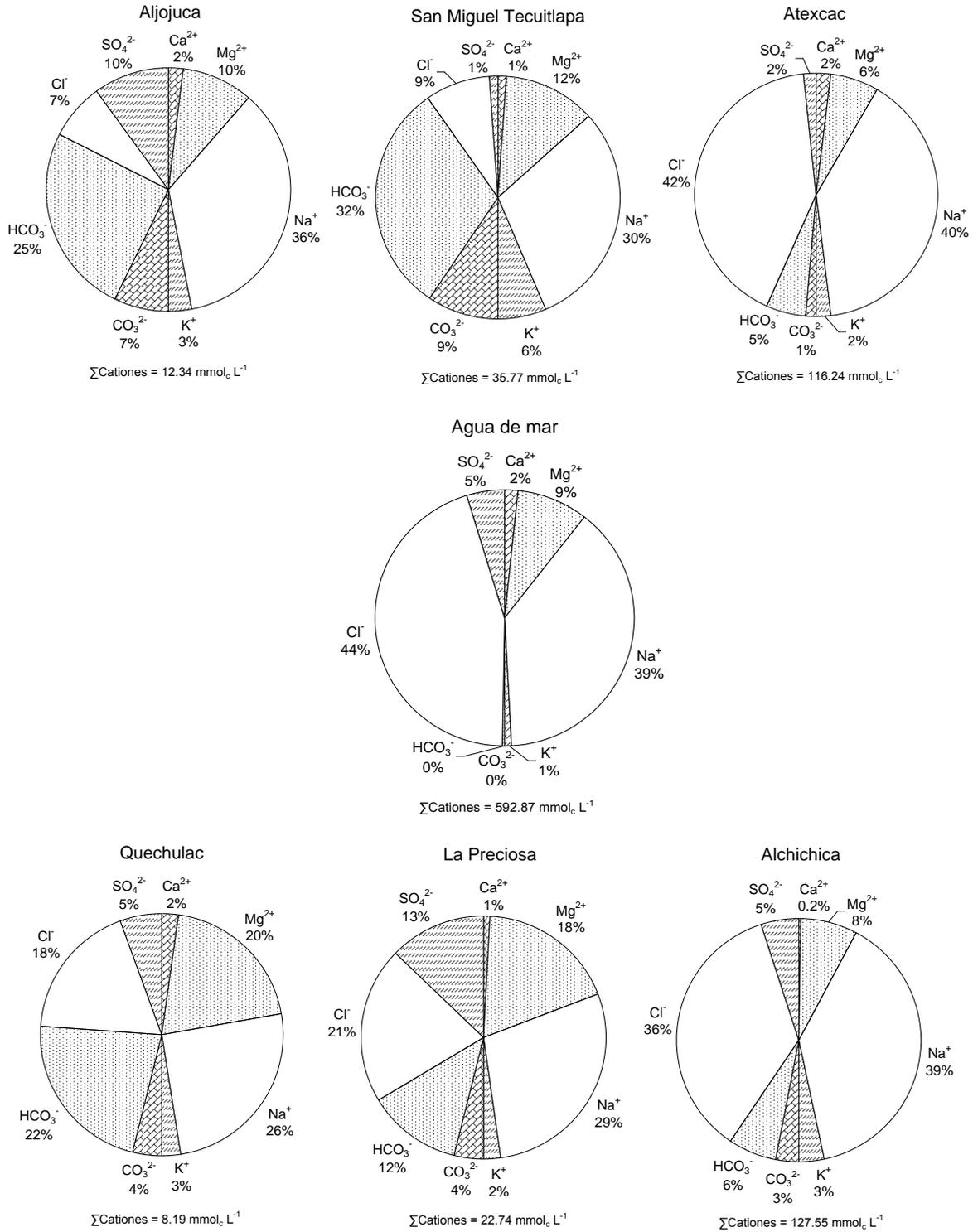


Figura 24. Concentración iónica en porcentaje de  $\text{mmolc L}^{-1}$  de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera 2008.

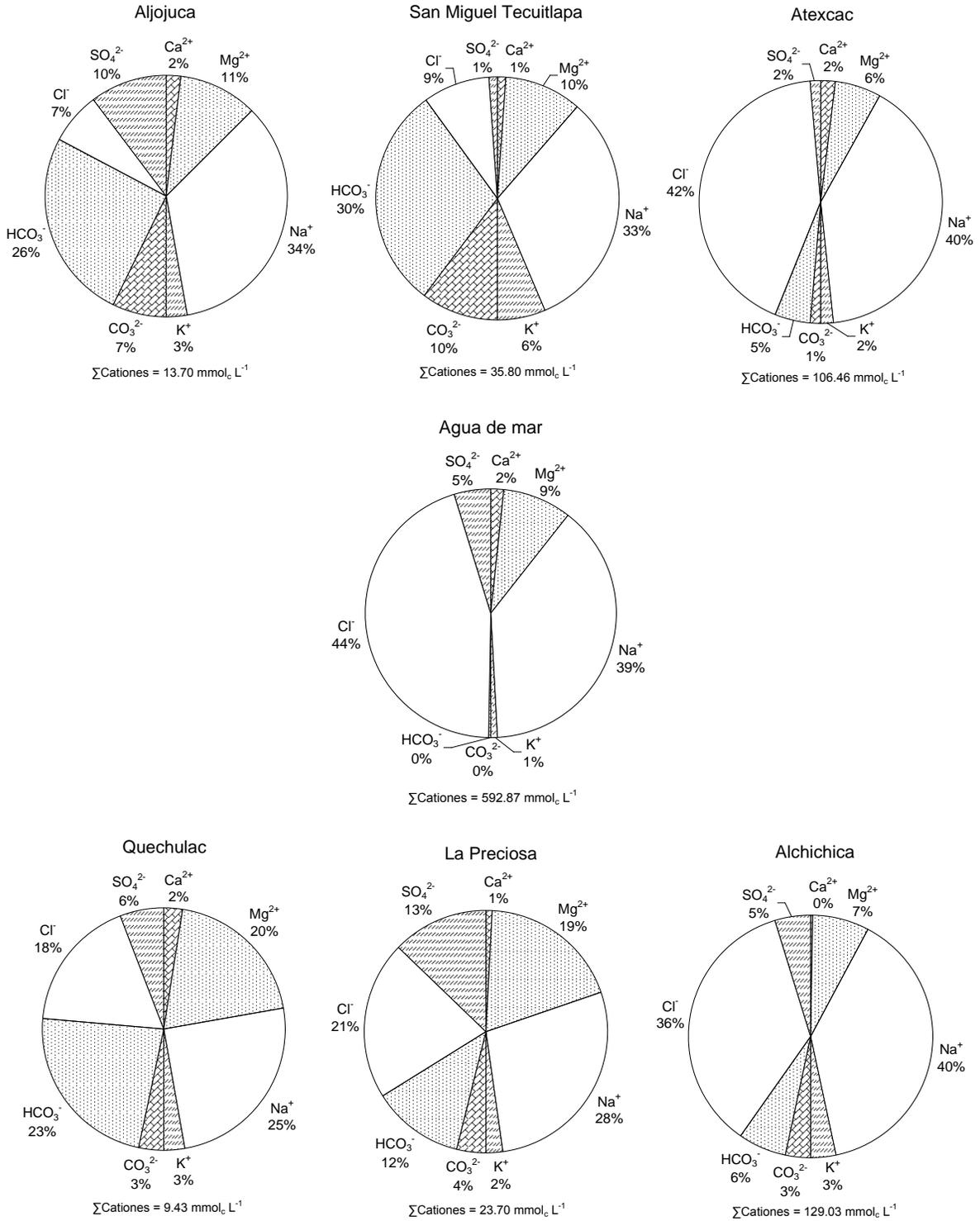


Figura 25. Concentración iónica en porcentaje de  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Otoño 2008.

Por último, en el Cuadro 14 se representan los contenidos de las diferentes sales hipotéticas para evidenciar las diferencias en las composiciones salinas de las aguas de los diferentes lagos cráter, para este efecto, se calcularon las sales hipotéticas expresadas en toneladas de cada sal para periodos de primavera y otoño de 2008.

Cuadro 14. Composición de las sales hipotéticas (en toneladas de sal) de los aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

Lago cráter:	Alchichica		Atexcac		Aljojuca		San Miguel Tecuittlapa		Quechulac		La Preciosa	
Volumen <sup>*</sup> (m <sup>3</sup> ) =	69.92 x 10 <sup>6</sup>		6.15 x 10 <sup>6</sup>		11.67 x 10 <sup>6</sup>		0.35 x 10 <sup>6</sup>		10.97 x 10 <sup>6</sup>		16.20 x 10 <sup>6</sup>	
Tipo de sal	Primavera	Otoño	Primavera	Otoño	Primavera	Otoño	Primavera	Otoño	Primavera	Otoño	Primavera	Otoño
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	30276.1	32944.2	945.3	893.1	1082.4	1187.5	121.5	131.2	360.5	366.3	1468.2	1545.5
Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	38293.8	3229.6	2362.4	2103.2	444.5	482.3	x	x	311.1	409.0	551.5	564.6
NaHCO <sub>3</sub>	2606.6	38293.8	1591.1	1090.0	5450.4	6166.0	266.4	288.4	912.3	1216.4	6627.1	7144.2
KHCO <sub>3</sub>	x	x	2604.1	2306.5	x	x	162.4	157.9	x	x	x	x
Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	49765.6	50583.6	x	x	x	x	198.9	164.4	1789.4	1941.9	x	x
NaCl	346971.7	348115.6	31162.2	28962.3	709.4	750.4	122.5	77.2	1603.1	1776.2	6098.0	5534.9
KCl	43368.6	44671.2	x	x	643.8	669.9	x	x	351.7	417.1	1280.1	1304.3
MgCl <sub>2</sub>	x	x	2333.1	2087.3	x	x	x	x	x	x	1048.8	1912.4
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	x	x	x	x	364.7	190.7	x	x	x	x	x	x
MgSO <sub>4</sub>	39763.5	39595.0	1339.8	1163.9	1390.6	1769.8	17.7	17.3	574.4	712.9	5332.7	5693.5
CaSO <sub>4</sub>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Suma =	551045.8	557433.0	42338.0	38606.3	10085.8	11216.5	889.4	836.2	5902.4	6839.7	22406.4	23699.3

\* Los volúmenes de agua que almacena cada lago cráter se tomaron del trabajo de Arredondo *et al.* (1983).

### 7.2.6 Distribución de concentraciones: conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y concentración catiónica (en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) en las aguas

Como se ha establecido, la concentración de electrolitos disueltos en el agua se expresa por lo común mediante la conductividad eléctrica que es un parámetro de intensidad o mediante una medida gravimétrica, que se refiere a un parámetro extensivo y que en este caso son los  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  (Tanji, 1990; Shainberg y Oster, 1978).

En las Figuras 26 y 27 se presenta la distribución de frecuencias de las diferentes aguas de los lagos cráter con respecto a su conductividad eléctrica (en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y la concentración catiónica (en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ).

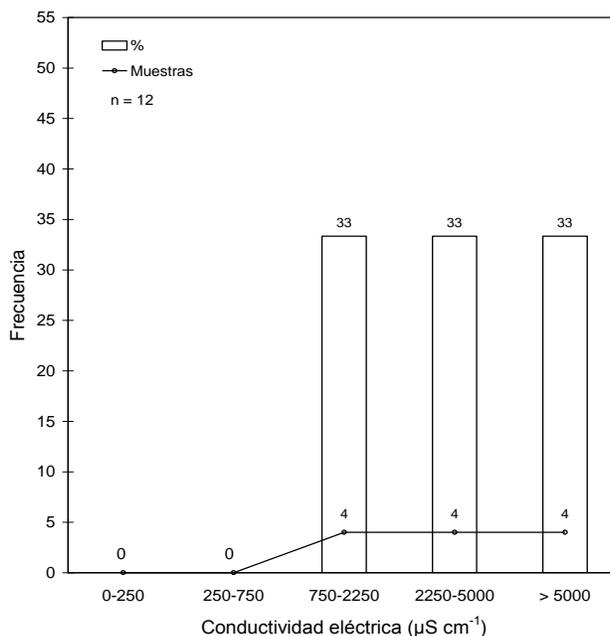


Figura 26. Distribución de frecuencias de los valores de la conductividad eléctrica de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

De acuerdo con los valores de la conductividad eléctrica establecidos en el diagrama de Richards (1990) para considerar la calidad de las aguas de riego, las aguas de los lagos cráter, de la Cuenca del Oriental, se clasificaron como sigue: 1. Aguas con conductividad eléctrica de  $750\text{-}2250 \mu\text{S cm}^{-1}$  o C3, en cuatro muestras; 2. Aguas con conductividad eléctrica de  $2250\text{-}5000 \mu\text{S cm}^{-1}$  o C4, en cuatro muestras; 3. Aguas con conductividad eléctrica  $> 5000 \mu\text{S cm}^{-1}$ , no útiles para riego, en cuatro muestras.

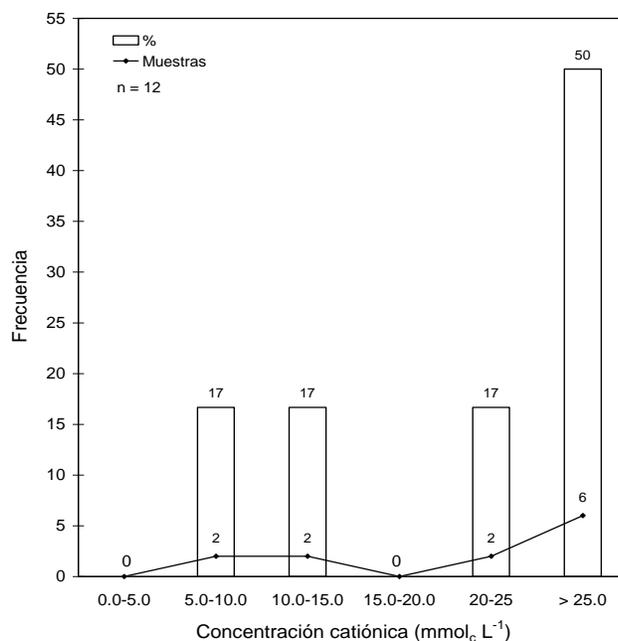


Figura 27. Distribución de frecuencias de los valores de la concentración de cationes de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

Por último, de acuerdo con los rangos de los valores de cationes (en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>), las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental se clasificaron como sigue: 1. Aguas con concentración de 5.0-10.0 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, en dos muestras; 2. Aguas con concentración de 10.0-15.0 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, en dos muestras; 3. Aguas con concentración de 20.0-25.0 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, en dos muestras; 4. Aguas con concentración > 25.0 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, en seis muestras.

#### 7.2.7 Relación entre las conductividades eléctricas determinadas experimentalmente y las determinadas teóricamente

La concentración total de las sales solubles en las aguas de diferente origen, para propósitos de diagnóstico y de clasificación, se ha considerado que esta se puede expresar en términos de la conductividad eléctrica en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . Las mediciones de las concentraciones electrolíticas en las aguas a través de la conductividad eléctrica en  $\mu\text{S cm}^{-1}$  son directamente proporcionales a los contenidos de sólidos totales disueltos

(STD) en  $\text{mg L}^{-1}$ , concentración total de cationes solubles (CTC) en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  y a la concentración total de aniones solubles (CTA) en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ . Esto se debe a los procesos de disociación electrolítica.

Con la finalidad de establecer en qué medida las mediciones experimentales de la conductividad eléctrica (en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) de las aguas de los lagos cráter corresponden con los valores teóricos de la conductividad eléctrica (en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) de estas mismas aguas se procedió a establecer la relación funcional  $\text{CE}_{\text{Teórica}} = f\alpha \text{CE}_{\text{Experimental}}$ . Para este efecto se calculó la conductividad eléctrica teórica en  $\mu\text{S cm}^{-1}$  para cada ion que se obtiene experimentalmente en las muestras de agua, de acuerdo con lo establecido por Eaton *et al.* (1995). En la Figura 28, se presenta la relación funcional  $\text{CE}_{\text{Teórica}} = f\alpha \text{CE}_{\text{Experimental}}$ .

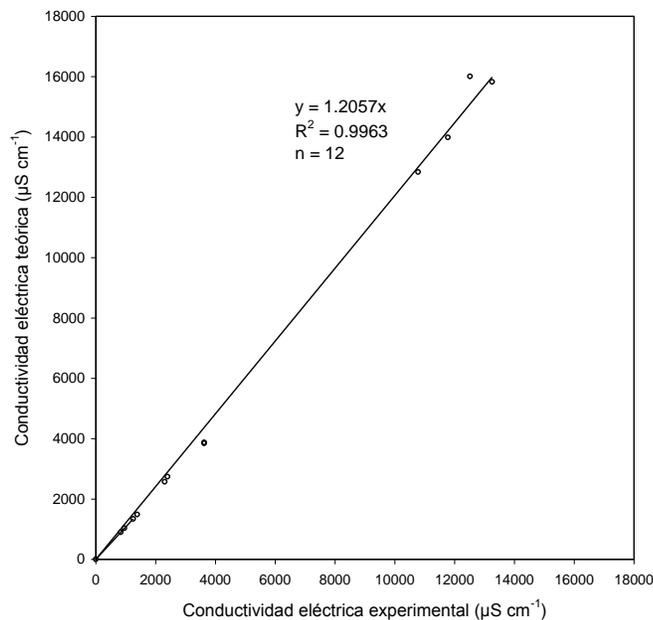


Figura 28. Relación funcional entre la conductividad eléctrica teórica y la experimental, en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

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

En la Figura 29 se presenta la relación funcional entre las concentraciones de las sales solubles de las aguas de los lagos cráter y sus valores correspondientes de la conductividad eléctrica:  $\text{mg L}^{-1} = f\alpha \text{ CE}$ . El valor de la pendiente  $\alpha$  encontrada es de 0.6267, que corresponde a soluciones ricas en iones cloruro.

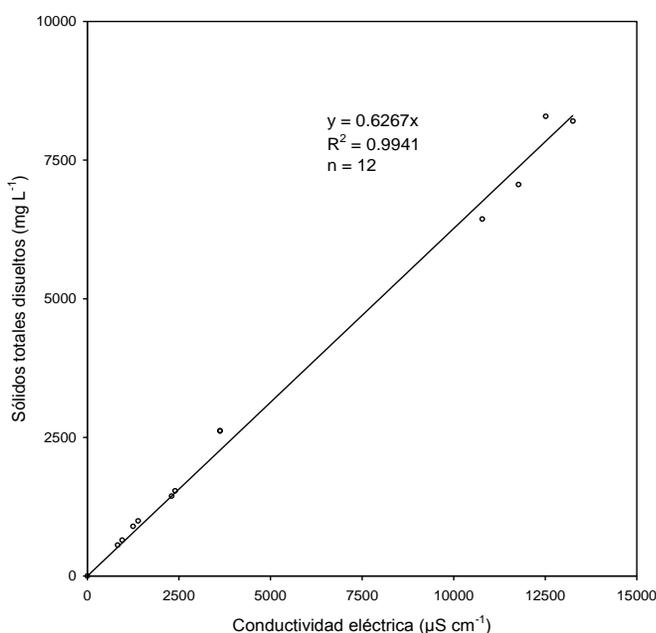


Figura 29. Concentración de sales expresadas en  $\text{mg L}^{-1}$  y su relación con la conductividad eléctrica en  $\mu\text{S cm}^{-1}$  de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

### 7.2.9 Relación de la suma de cationes (en $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ) con la conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$ )

Como ya se ha mencionado, una de las características que tienen las soluciones electrolíticas acuosas, es que su conductividad eléctrica expresada en  $\mu\text{S cm}^{-1}$  está en función directamente proporcional a su concentración iónica. En la Figura 30 se

presenta el valor de la relación funcional  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1} = f \alpha \text{ CE}$ , para los cationes de las aguas de los lagos cráter. El valor de la pendiente es de 0.0099.

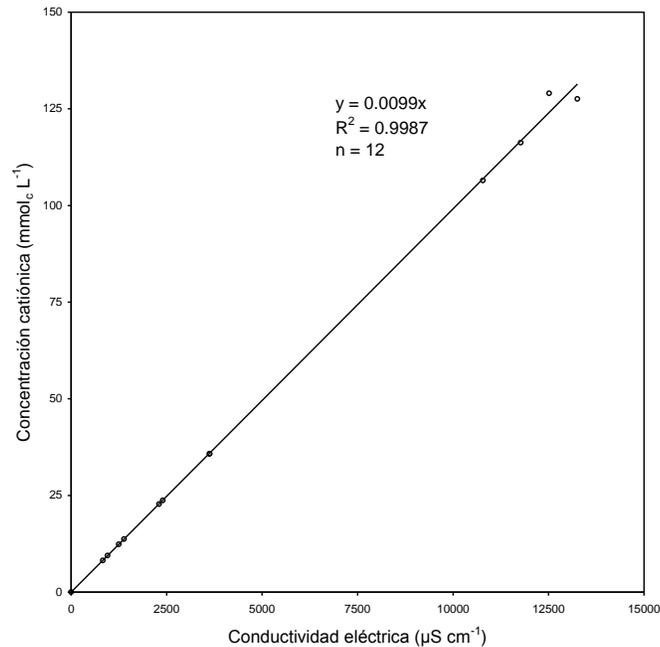


Figura 30. Relación de la suma de cationes en  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$  con la conductividad eléctrica en  $\mu\text{S cm}^{-1}$  de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

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

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

La presión osmótica de las soluciones acuosas es proporcional a la concentración de solutos. Ampliamente se ha establecido por Strogonov (1964) que el efecto de las sales sobre el crecimiento de los cultivos es esencialmente de naturaleza osmótica. También a su vez, es necesario señalar que, como la presión osmótica es una de las propiedades coligativas de las soluciones, su expresión físico-química en las soluciones depende de la concentración total de iones, más que de la presencia de una especie u otra especie de iones.

La presión osmótica experimental de las aguas de los lagos cráter se determinó de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\text{STD} = 0.6267 \text{ CE} \quad \text{y} \quad \pi = 0.00040 \text{ CE}$$

$$\pi = 0.00040/0.6267\text{STD}$$

En la Figura 31 se presenta la relación  $\pi_{\text{Teórica}} = f a \pi_{\text{Experimental}}$  y el valor de  $a$  es de 1.1112. Este valor corresponde a soluciones ricas en cloruros. El lago cráter de Alchichica tiene una concentración de  $\text{Cl} = 93.22 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  en el muestreo de primavera de 2008 y de  $93.75 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  en el muestreo de otoño de 2008. El lago cráter de Atexcac tiene una concentración de  $\text{Cl} = 94.66 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  en primavera y una concentración de  $87.70 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  en otoño de 2008. En la Figura 32 se presenta la relación de la presión osmótica en atm y la conductividad eléctrica en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

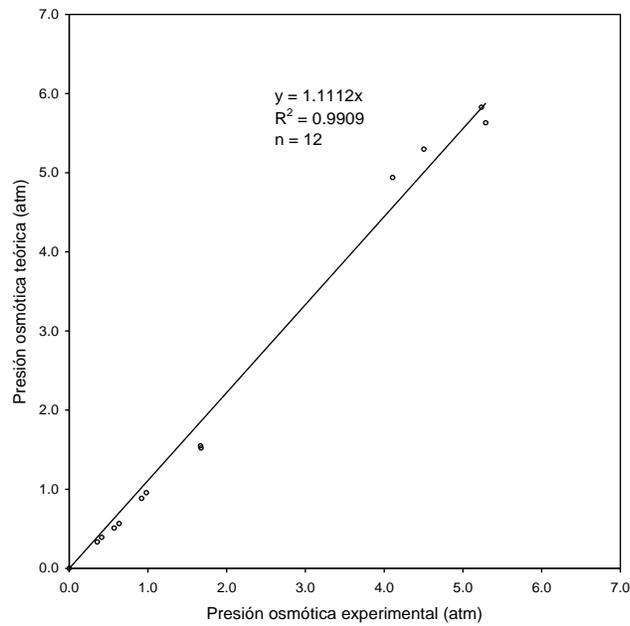


Figura 31. Relación entre la  $\pi_{\text{Teórica}}$  y la  $\pi_{\text{Experimental}}$  en atm de las muestras de agua de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

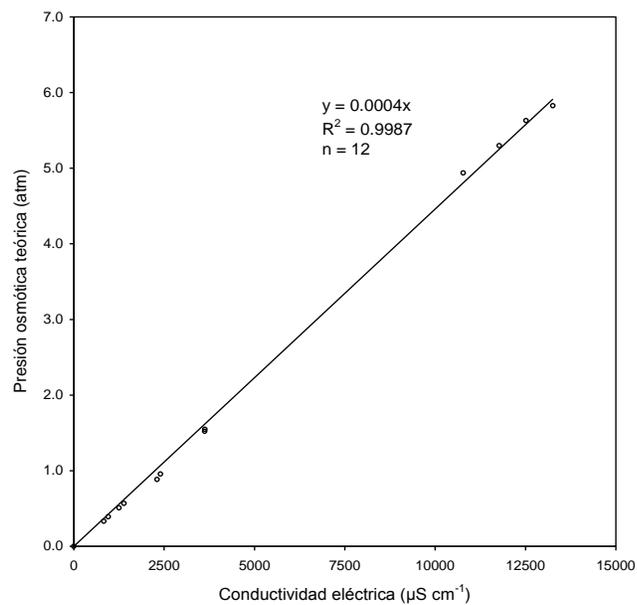


Figura 32. Relación entre la  $\pi_{\text{Teórica}}$  en atm y la conductividad eléctrica en  $\mu\text{S cm}^{-1}$  de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

### 7.2.11 Relación entre la concentración iónica ( $\text{mmol-ion L}^{-1}$ ) y la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )

Debido a que las mediciones de la presión osmótica se llevan a cabo a temperaturas constantes, es así entonces, que la concentración de las sales disociadas se expresa en unidades de molaridad ( $n/v$ ). Y al igual que todas las propiedades coligativas de las soluciones salinas, estas relaciones son directamente proporcionales. Esto es lo que debería expresarse, ya que todas las propiedades coligativas de las soluciones dependen sólo del número de partículas de los solutos disueltos en la disolución electrolítica.

En la Figura 33 se presenta la relación  $\text{mmol-ion L}^{-1}$  y la conductividad eléctrica en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

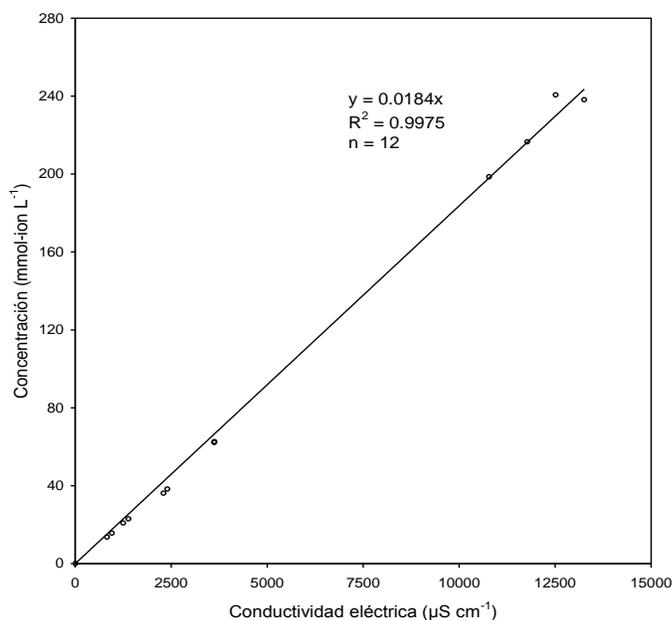


Figura 33. Relación entre los  $\text{mmol-ion L}^{-1}$  y la conductividad eléctrica en  $\mu\text{S cm}^{-1}$  de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

### 7.2.12 Clasificación de las aguas de los lagos cráter, de acuerdo con la relación de adsorción de sodio (RAS)

La presencia de los iones de sodio, en concentraciones superiores de ciertos valores con respecto a las concentraciones de los iones de calcio y de magnesio en las aguas de diferente origen y en las soluciones de los suelos, se considera peligroso, ya que al emplear estas aguas para el riego, en los suelos se presentan los procesos siguientes: a) deterioro paulatino de las propiedades físicas de los suelos y b) efectos de toxicidad en los cultivos; debido a las grandes cantidades de iones de sodio en las soluciones de los suelos. El deterioro de las propiedades físicas de los suelos se debe a los altos niveles de sodio intercambiable que se encuentran en los suelos.

La sodicidad de un suelo se encuentra determinada por el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) ya que éste se refiere a la cantidad de cargas negativas de los sistemas coloidales arcillosos y orgánicos que están neutralizados con los iones de sodio. El porcentaje de sodio intercambiable puede ser estimado mediante la utilización de la relación de adsorción de sodio (RAS) de las aguas de riego.

Durante la evaluación del efecto de las sales solubles que se encuentran en las aguas de diferente origen sobre los suelos; la estimación cuantitativa de los siguientes dos parámetros es indispensable: el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la relación de adsorción de sodio (RAS).

El régimen físico-químico de todas las aguas de los lagos cráter es de permanencia alcalina  $\text{pH} > 8.0$ . Esto significa que si se presenta la necesidad de utilizar directamente, para el riego de cultivos, las aguas de los lagos cráter de Quechulac, La Preciosa y de Aljojuca; entonces, estas aguas deben ser mejoradas mediante la neutralización parcial de una cierta alcalinidad con ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). En la Figura 34 se presenta la relación funcional entre la relación de adsorción de sodio ajustada con la relación de sodio original ( $\text{RAS}_{\text{aj}}\text{-RAS}$ ) y en la Figura 35 la relación de adsorción de sodio corregida con la relación de sodio original ( $\text{RAS}^0\text{-RAS}$ ).

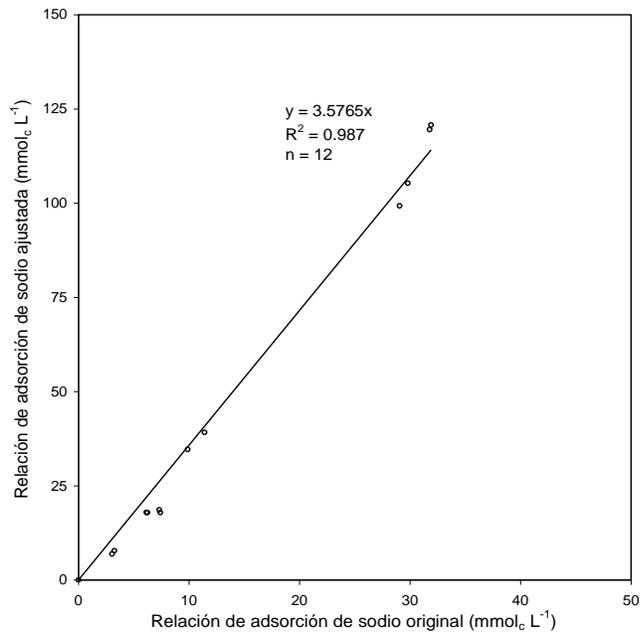


Figura 34. Relación entre los valores de la RAS ajustada y la RAS original de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

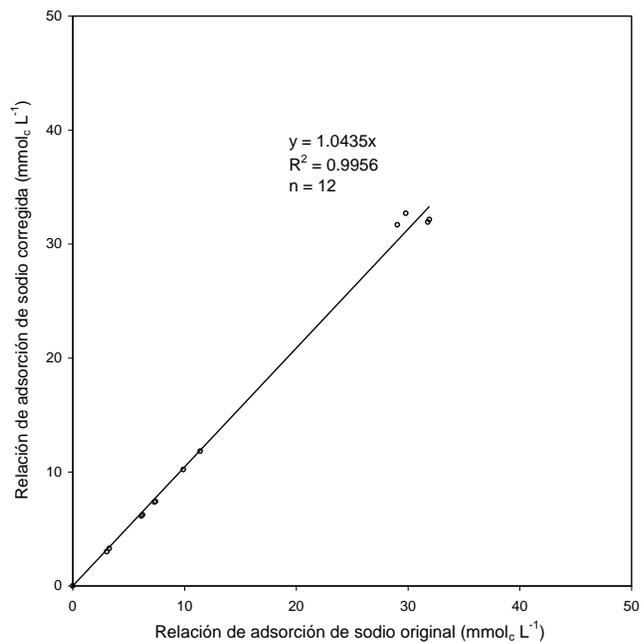


Figura 35. Relación entre los valores de la RAS corregida y la RAS original de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

Con los valores numéricos de los diferentes RAS aquí calculados, se obtendrán diferentes valores de sodio intercambiable (PSI). La determinación de valores extremos de  $PSI_{min}$ - $PSI_{max}$  es muy útil para el manejo de las fuentes de calcio y para mejorar los suelos sódicos. La Figura 36 ilustra cómo quedan distribuidos en el diagrama de Richards las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental de acuerdo con los valores numéricos de la relación de adsorción de sodio en sus tres conceptualizaciones.

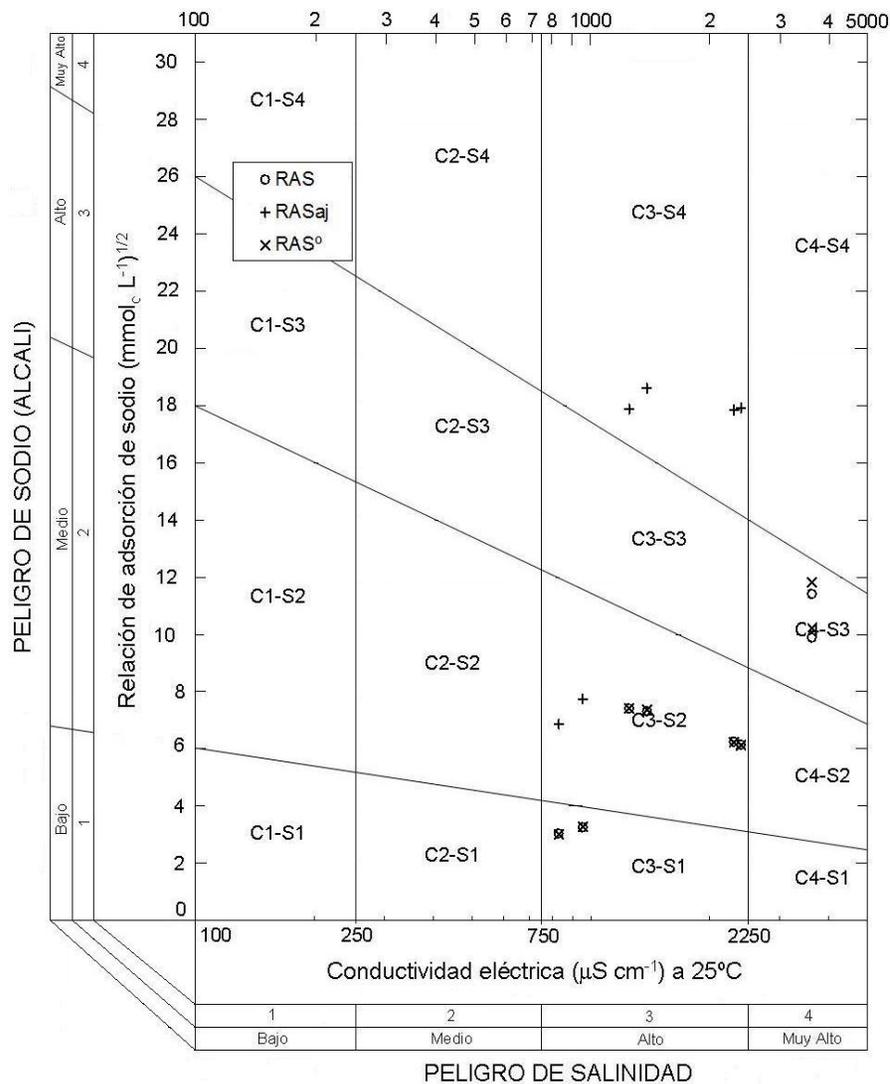


Figura 36. Clasificación de las aguas, mediante el diagrama de Richards, de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

En el Cuadro 15 se presenta la clasificación de las aguas de los lagos cráter, de acuerdo con sus valores de RAS y CE. Aquí se tienen en cuenta las variaciones en las concentraciones de iones de calcio y de magnesio de acuerdo con los procesos de precipitación de la calcita.

Cuadro 15. Síntesis de clasificación de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental con base en el diagrama de Richards. Estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

Formulaciones de RAS	Clasificación de acuerdo al diagrama de Richards (1990)							Fuera del diagrama
	C3-S1	C3-S2	C3-S4	C4-S2	C4-S3	C4-S4	C4-Fuera	
<b>RAS</b>								
Muestras	2	2	-	2	2	-	-	4
<b>RAS<sub>aj</sub></b>								
Muestras	-	2	2	-	-	2	2	4
<b>RAS<sup>0</sup></b>								
Muestras	2	2	-	2	2	-	-	4

### 7.2.13 Clasificación de las aguas de los lagos cráter en cuanto al peligro de disminución de la infiltración

Los valores de la RAS original que son calculados mediante los análisis químicos de una determinada agua, por lo general, representa el RAS del agua de riego que se aplica a los suelos. El RAS ajustado (RAS<sub>aj</sub>) de las aguas de riego contiene una corrección para disolución/precipitación de la calcita.

El proceso de infiltración se refiere a la facilidad con que el agua atraviesa la superficie del suelo, y esta se mide en términos de sodicidad. En este trabajo se utilizó el término “problema de infiltración” para indicar el efecto de la salinidad y de

la sodicidad en relación a la facilidad con que el agua que se aplica a los suelos entra y se desplaza en los primeros centímetros del suelo.

Un problema de infiltración se hace evidente, cuando el agua de riego no atraviesa la superficie del suelo a una velocidad lo suficientemente rápida, como para permitir la renovación del agua consumida por el cultivo entre riegos.

Una tasa de infiltración es considerada baja si es de  $3.0 \text{ mm h}^{-1}$ , mientras que una tasa de infiltración de  $12.0 \text{ mm h}^{-1}$  es considerada relativamente alta. En la Figura 37 se ilustra la relación RAS-CE de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, y cómo se clasifican de acuerdo con su capacidad de infiltración.

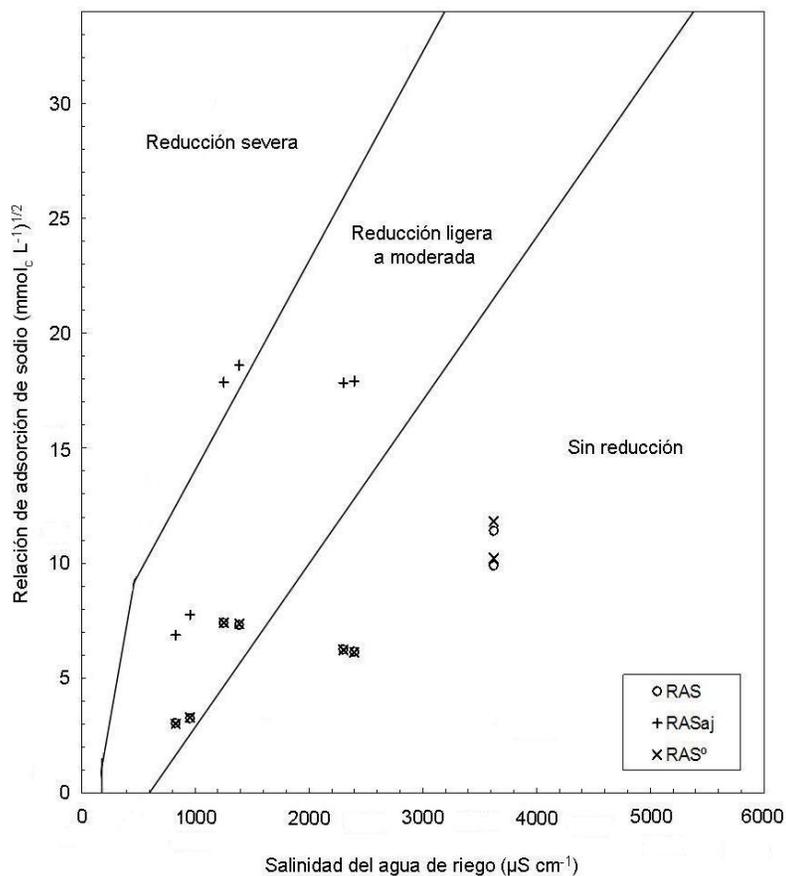


Figura 37. Clasificación de las aguas, mediante el diagrama de Ayers y Westcott, de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

#### 7.2.14 Carbonato de sodio residual (CSR) en las aguas de los lagos cráter

Todas las aguas que se utilizan para riego contienen alguna cantidad de sales disueltas. De tal manera que, si el agua de riego que se aplicó aun suelo es repetidamente evaporada del mismo y transpirada por las plantas en una masa de suelo determinada, el contenido de sales en el suelo aumentará nuevamente hasta un valor tal que el contenido de cationes, de una determinada agua de riego en el suelo, será muy alto, y si el ion sodio se caracteriza por tener una alta proporción con respecto a los iones divalentes, entonces, durante el uso de esta agua de riego, en el complejo de intercambio catiónico aumentará el sodio intercambiable.

La presencia de iones de sodio en el complejo de intercambio catiónico causa numerosos fenómenos adversos en los suelos aumentando la susceptibilidad para formar costras y provocando una aeración muy pobre.

Eaton (1950), en su tiempo sugirió que estos efectos nocivos pueden ser agravados si las aguas de riego contienen altos valores de iones bicarbonato. Las aguas de los lagos cráter: Quechulac, La Preciosa y de Aljojuca contienen cantidades considerables de bicarbonatos.

El lago cráter de Quechulac contiene ( $\text{CO}_3 + \text{HCO}_3 = 4.19 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ), el lago cráter de La Preciosa contiene ( $\text{CO}_3 + \text{HCO}_3 = 7.00 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ). El lago cráter de Aljojuca contiene ( $\text{CO}_3 + \text{HCO}_3 = 7.78 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ).

Las cantidades de iones de calcio  $\text{Ca}^{2+}$  y de iones de bicarbonato  $\text{HCO}_3^-$  que se precipitan son equivalentes.



Las variaciones de la concentración de los iones de calcio modifica los valores de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  en la relación de adsorción de sodio (RAS).

Es así que, Eaton (1950) propuso el parámetro carbonato de sodio residual (CSR), como una medición adicional para evaluar el peligro de sodicidad debido a los altos contenidos de iones bicarbonato de las diferentes aguas, como consecuencia de la precipitación de los iones de calcio y de magnesio. El carbonato de sodio residual se calcula con la siguiente ecuación:

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

En la Figura 38 se muestra la distribución de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental de acuerdo a los valores de CSR.

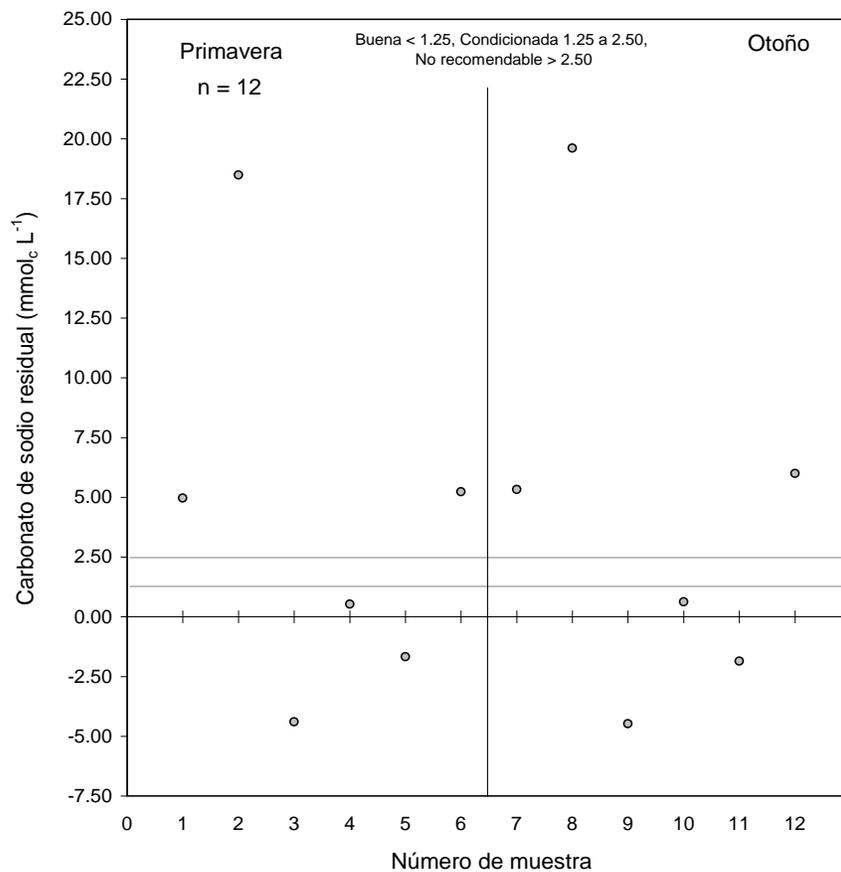


Figura 38. Evaluación del carbonato de sodio residual en las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

### 7.2.15 La relación funcional entre el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la relación de adsorción de sodio (RAS) en las aguas de los lagos cráter

Es de mucha importancia tener la posibilidad de predecir la distribución de los iones en la solución del suelo y los iones adsorbidos en los sistemas coloidales de los suelos cuando se tienen condiciones de equilibrio. Cuando esto se tiene, entonces se pueden manejar los problemas de salinidad y de sodicidad

Un parámetro de evaluación muy importante, sobre la posibilidad de que en una determinada agua de riego se cuantifique el nivel en que se deberá encontrar el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) en el complejo de intercambio de cationes de los suelos, debido a los procesos de intercambio de iones entre las aguas y los suelos, es la relación de adsorción de sodio (RAS). Los efectos del ion sodio sobre los sistemas coloidales de los suelos están bien correlacionados.

El peligro potencial de la sodicidad de una agua de riego es a veces evaluado con los valores de la relación de adsorción de sodio (RAS) y con los valores de la salinidad.

En los trabajos de caracterización y diagnóstico de los peligros de sodicidad de las aguas de riego que se aplican a los suelos, el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) de un suelo es estimado de acuerdo con los valores de la relación de adsorción de sodio (RAS), cuando una agua determinada de riego se encuentra en equilibrio con el suelo en condiciones de saturación.

Las reacciones de intercambio de iones y sus ecuaciones describen la distribución de cationes entre la fase adsorbida y la fase soluble

La ecuación para calcular el PSI a partir de la relación de adsorción de sodio (RAS) se obtiene de la ecuación de intercambio de cationes de Gapon.

Ecuación de intercambio de cationes de Gapon:

$$\frac{X_{Na}}{CIC - Na} = K_{RAS} \quad y \quad PSI = \frac{X_{Na}}{CIC} 100$$

Después de hacer los arreglos correspondientes, la ecuación final queda:

$$\frac{PSI}{100 - PSI} = K_{RAS}$$

Al despejar PSI, queda:

$$PSI = \frac{K_{RAS}}{1.0 + K_{RAS}} 100$$

Esta última es la ecuación para calcular el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) de un suelo cuando se conoce la relación de adsorción de sodio (RAS) de una determinada agua de riego en equilibrio y en condiciones de saturación.

En la Figura 39 se presenta la relación funcional PSI-RAS, para los diferentes valores de la relación de adsorción de sodio (RAS) calculados bajo diferentes conceptualizaciones, de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental.

La relación funcional PSI-RAS se calculó para los siguientes coeficientes de selectividad iónica de Gapon:  $K_1 = 0.01000$ ;  $K_2 = 0.01152$  y  $K_3 = 0.01690$ .

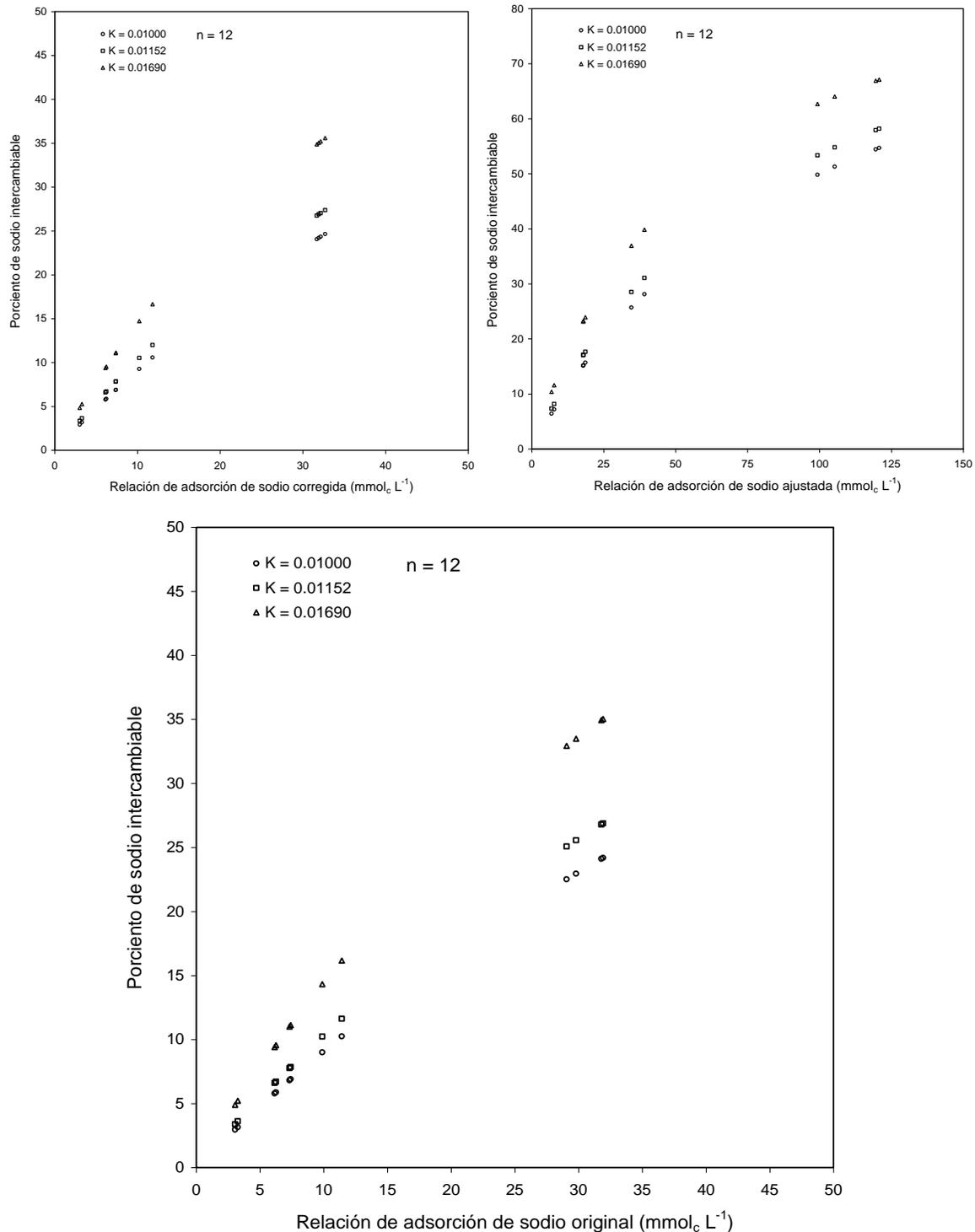


Figura 39. Relación funcional PSI-RAS con base en las distintas formulaciones de la RAS y valores de K de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

## 7.2.16 Distribución del boro en las aguas de los lagos cráter

Para comprender por qué se tienen grandes concentraciones de compuestos iónicos en los lagos cráter de Alchichica y de Atexcac, enseguida se presenta la composición de gases fumarólicos del volcán Showa en Japón (Cuadro 16).

Cuadro 16. Composición química de los gases fumarólicos del volcán Showa en Japón.

Componente	Contenido con referencia al condensado (g L <sup>-1</sup> )			Componente	Contenido con referencia al condensado (g L <sup>-1</sup> )		
	Nº 9081 760º	Nº 9051 525º	Nº 9063 220º		Nº 9081 760º	Nº 9051 525º	Nº 9063 220º
Cl	0.728000	0.420000	0.433000	H <sub>2</sub>	0.685000	0.381000	0.020000
F	0.238000	0.169000	0.035000	NH <sub>3</sub>	0.001300	0.000800	0.047000
Br	0.001100	0.000900	0.001200	N <sub>2</sub>	0.567000	0.067600	1.250000
H <sub>2</sub> S	0.008000	0.042000	1.080000	Ar	0.000600	-	0.001500
S	0.003700	0.001800	-	CH <sub>4</sub>	0.001500	0.018000	-
SO <sub>2</sub>	1.490000	0.716000	0.716000	SiO <sub>2</sub>	0.253000	0.289000	0.048000
SO <sub>3</sub>	0.021000	0.011000	0.002700	Al	0.015000	0.014000	0.001300
CO	0.050000	0.034000	-	Fe	0.001300	0.001200	0.005900
CO <sub>2</sub>	29.200000	25.800000	13.000000	Ca	0.004600	0.004300	0.021000
B	0.039000	0.021000	0.005600	Mg	0.032000	0.014000	0.007900
PO <sub>4</sub>	0.002800	0.003000	0.000800	Na	0.022000	0.022000	0.013000
NO <sub>2</sub>	0.000010	0.000001	0.000008	K	0.015000	0.011000	0.001700
O <sub>2</sub>	0.051000	0.047000	0.023000				

Fuente: Ivanov, 1967.

Aunque el boro es uno de los elementos raros y dispersos en la corteza terrestre se tienen concentraciones extraordinarias de minerales del boro en algunas áreas. La distribución de depósitos del boro en el mundo se presenta a continuación:

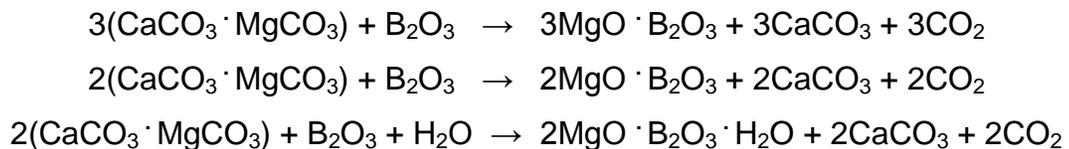
Depósitos endogénicos: a) cristalización de minerales del boro en soluciones residuales de la magma de alta fluidez, b) metasomatismo debido a las emanaciones magmáticas y a la actividad hidrotermal, c) actividades fumarólicas y solfatáricas.

Depósitos exogénicos: salmueras de alta concentración y depósitos salinos de origen marino.

La mayor fuente del boro son las emanaciones de magmas andesíticas y riolíticas. Los vapores de agua a alta temperatura de las emanaciones volcánicas tienen cantidades apreciables de boro, por ejemplo en la vecindad de Toscana, Italia (único caso) el vapor de agua libera al boro en cantidades suficientes para producir ácido bórico, así como también este vapor genera electricidad.

De acuerdo con Yáñez y García (1982) se menciona que los lagos cráter de Alchichica y Atexcac, todavía en el presente, en estos se tiene la influencia de una actividad fumarólica residual, y además, también hacen hincapié en que los altos contenidos de boro que se encuentra en estos lagos cráter se debe a procesos hidrotermales iniciales.

Como una forma de ilustrar los orígenes de los altos contenidos del boro en la aguas de los lagos cráter de Alchichica y de Atexcac, en líneas abajo se presentan las reacciones del metasomatismo de la dolomita con los boratos. En este proceso, los boratos pasan a formar parte de los óxidos de magnesio (Watanabe, 1967).



Las altas concentraciones de boro en los lagos de Alchichica y Atexcac se deben a las explosiones freatomagmáticas sobre calizas.

En la Figura 40 se presentan los contenidos de boro en los lagos cráter de la Cuenca del Oriental.

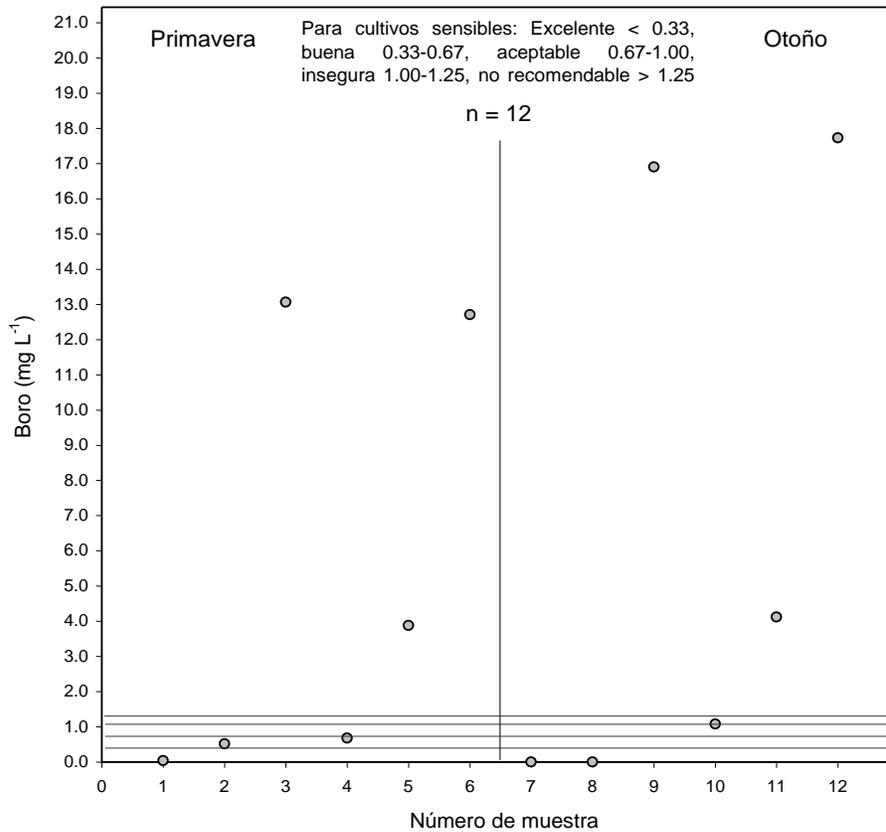


Figura 40. Evaluación del contenido de boro en las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

#### 7.2.17 Contenido de fósforo en las aguas de los lagos cráter

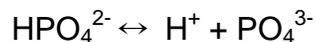
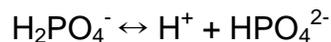
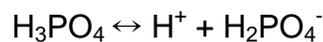
De la gran multiplicidad de los componentes iónicos que se encuentran en pequeñas cantidades en las aguas tanto superficiales como subterráneas, en gran particularidad, tienen mucha importancia los compuestos del fósforo, nitrógeno y del silicio. Sin estos elementos en el agua así como en el suelo, no podrían desarrollarse los procesos bioquímicos de la vida. Los contenidos de los compuestos del fósforo, nitrógeno y del silicio, determinan la productividad biológica de las diferentes aguas; por eso, a estos elementos se les ha llamado elementos biogénicos.

Los compuestos del fósforo. El fósforo en las aguas superficiales y subterráneas se encuentra en forma de iones del ácido ortofosfórico, que es el fósforo mineral, y en

forma de compuestos orgánicos, que es el fósforo orgánico. Si consideramos la gran diversidad de formas y compuestos del fósforo, es mejor expresar su concentración en fósforo elemental en  $\text{mg P L}^{-1}$ :

$$P_{\text{total}} = P_{\text{inorgánico}} + P_{\text{orgánico}}$$

Todas las formas iónicas del fósforo, de los diferentes compuestos que se encuentran en las aguas naturales tanto superficiales como subterráneas, así como en los cuerpos de agua, en dependencia de condiciones concretas pasan de una forma a otra forma. Por ejemplo, el ácido ortofosfórico  $\text{H}_3\text{PO}_4$  en una solución acuosa puede disociarse en tres pasos:



Los ciclos biogeoquímicos de los elementos biogénicos se inician con la fotosíntesis y se terminan con la descomposición de sustancias orgánicas.

La génesis de los fosfatos, en las plataformas continentales de los mares y océanos y en las diferentes cuencas en el pasado geológico, es un tema que se ha discutido por más de 100 años. Se conocen tres hipótesis fundamentales sobre la formación de los fosfatos: biogénico, químico-génico y volcanogénico.

La hipótesis biogénica del origen de los fosfatos, en su esencia, se refiere a la acumulación de residuos orgánicos, que son ricos en fosfatos, y que posteriormente de acuerdo con los procesos diagenéticos se distribuyen en las plataformas marinas.

La hipótesis química de formación de fosfatos se debe a un proceso de precipitación química de fosfatos de calcio en las aguas marinas y que ocurre en las plataformas continentales bajo el mar.

La hipótesis volcánica se refiere al ingreso del fósforo en los fondos oceánicos desde las profundidades magmáticas del planeta y su precipitación en la cercanía de los volcanes submarinos.

Sobre los contenidos de fosfatos en las aguas de los lagos cráter indudablemente que una fracción de fosfatos es de origen volcanogénico y las otras fracciones de fosfatos son de origen biogénico. En la Figura 41 se presentan los contenidos de fósforo en las aguas de los lagos cráter.

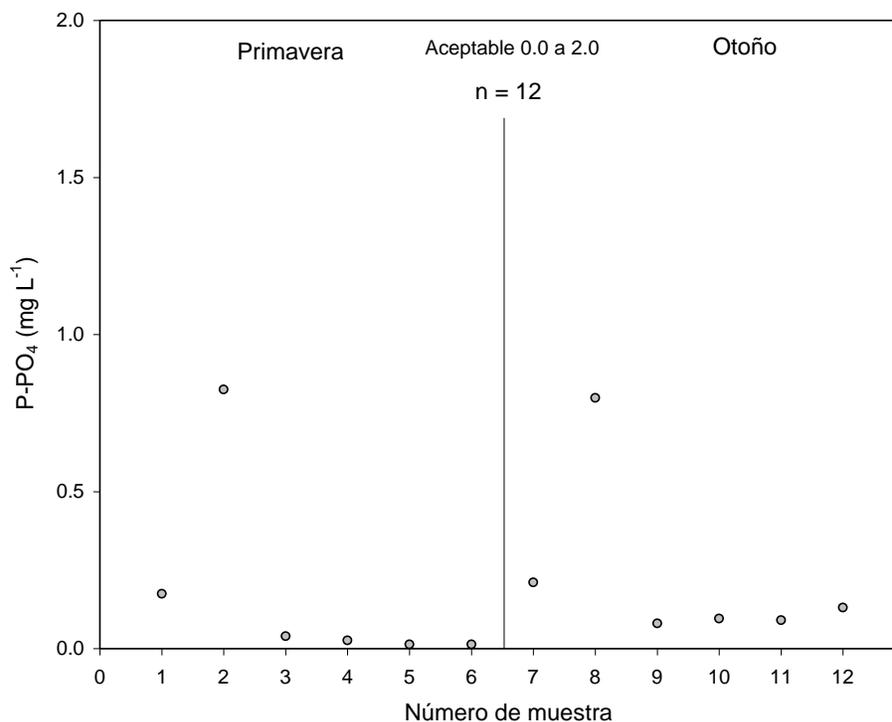
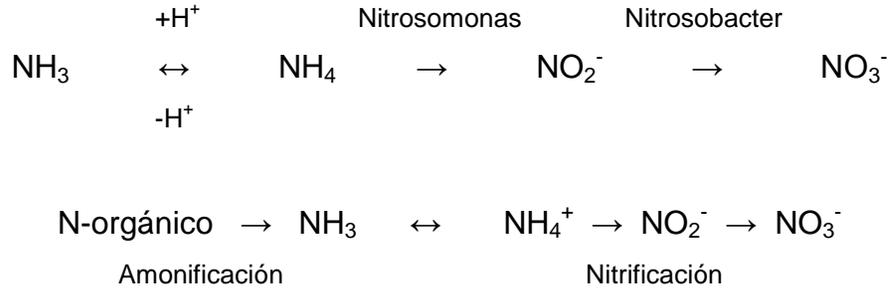


Figura 41. Evaluación del contenido de fósforo en las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

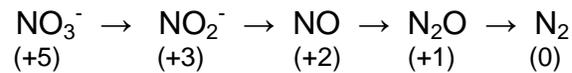
#### 7.2.18 Contenido de nitrógeno en las aguas de los lagos cráter

El nitrógeno en los sistemas acuáticos se encuentra en sus formas inorgánicas: N<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, así como en las micropartículas de la materia orgánica.

La nitrificación se presenta como sigue:



La desnitrificación bacteriana ocurre de la siguiente manera:



En la Figura 42 se presentan los contenidos de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, evaluadas solamente en el otoño del 2008. Ninguna muestra presenta restricción para su uso en la agricultura.

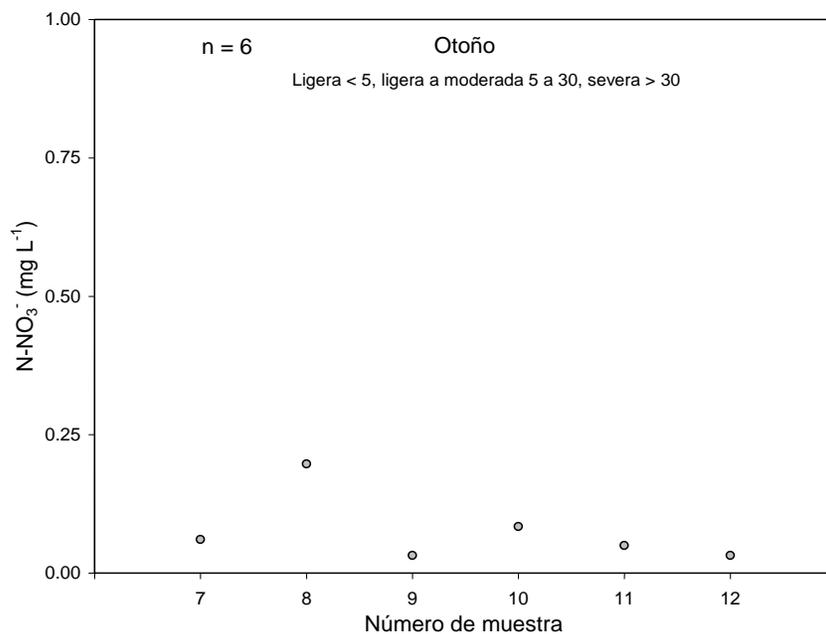


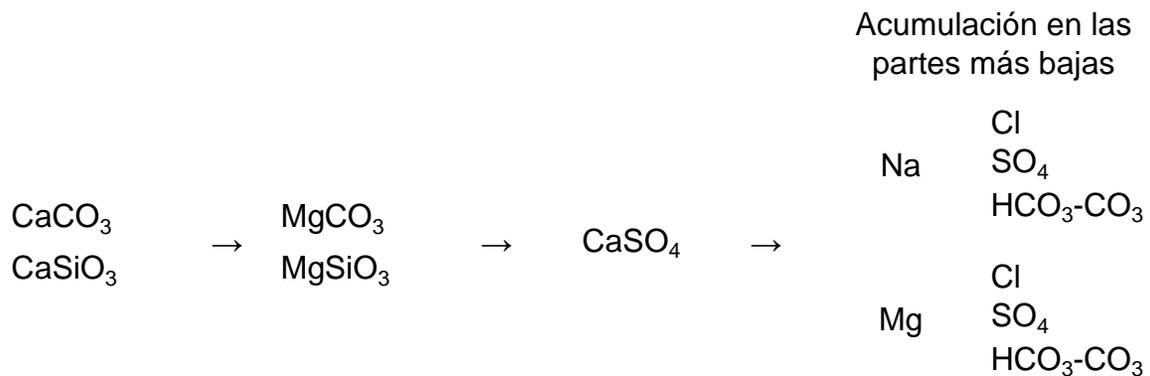
Figura 42. Evaluación del contenido de nitrógeno en las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Otoño 2008.

### 7.3 Acumulación de sales en las planicies lacustres de los ex-lagos de Totolcingo y Tepeyahualco en la Cuenca del Oriental

Se tiene en la parte central de la Cuenca del Oriental llanuras que presentan actualmente áreas cubiertas por ciénegas, pequeños cuerpos de agua muy someros que varían en extensión de acuerdo con las temporadas de lluvia. Sin duda durante todo el pleistoceno, en correspondencia con los periodos interglaciares, las llanuras de la Cuenca del Oriental estaban ocupadas por cuerpos de agua de una profundidad considerable. Estos son los ex-lagos de Totolcingo y de Tepeyahualco. En la actualidad hasta cierta distancia adentro de las estribaciones de los vasos ex-lacustres de Totolcingo y de Tepeyahualco se llevan a cabo labores agrícolas.

Los espesores litológicos de las llanuras lacustres de Totolcingo y de Tepeyahualco están rellenos de sedimentos piroclásticos que en el tiempo de formación de la cuenca endorreica del Oriental han peneplenizado formando con esto las cubetas lacustres de Totolcingo y de Tepeyahualco. Las sales más solubles se han acumulado en las partes más bajas de las depresiones lacustres de Tepeyahualco y Totolcingo.

La secuencia de precipitación de compuestos durante su proceso de migración a las partes bajas se presenta como sigue:



La acumulación de sales en las partes más bajas de una depresión conduce a que en los espesores de suelo, las soluciones de estos suelos, sean de alta concentración, los espesores de suelo en estas depresiones son de gran potencia.

Con la finalidad de conocer cómo se distribuyen las sales solubles en ciertos espesores de suelo, en diferentes partes de ubicación dentro de las planicies lacustres de Totolcingo y de Tepeyahualco, para este efecto, se evaluaron los contenidos de sales solubles en dos relaciones suelo-agua de extracción de sales: 1:~0.2-0.6 (saturación) y 1:5.

### 7.3.1 Sales solubles en la zona lacustre de Totolcingo

El Perfil 1 de distribución de sales solubles, Figura 43, que corresponde a una zona de estribaciones de la provincia lacustre de Totolcingo; en cuya área actualmente se cultivan diversos cultivos como: col, zanahoria, maíz, cebada y avena. En este perfil de suelo es notable que en las partes superficiales se tenga una mayor concentración de sales 1.0-0.8 meq/100 g en el extracto de suelo 1:~0.2-0.6 (0-20-30 cm); en cambio, en una profundidad de (40-80 cm) la concentración total de sales disminuye 0.6 meq/100 g en el extracto de suelo 1:~0.2-0.6.

La acumulación de sales en las partes superficiales del perfil de suelo de esta zona se debe a procesos de evapotranspiración. La acumulación de sales, 0.75-1.0 meq/100 g del extracto de suelo 1:~0.2-0.6, en las partes bajas del perfil de suelo de esta zona se debe a la influencia que tienen estas profundidades con espesores saturados y a procesos de ascensión capilar del espejo del nivel freático.

Es este mismo perfil se evaluaron las sales solubles en extractos de suelos de relación 1:5. Aquí, en esta relación se extrae una mayor cantidad de sales. Esto se debe a que el extracto de suelo 1:5 extrae una mayor cantidad de sales, debido fundamentalmente a una mayor capacidad de solubilizar sales que tiene la relación suelo-agua 1:5.

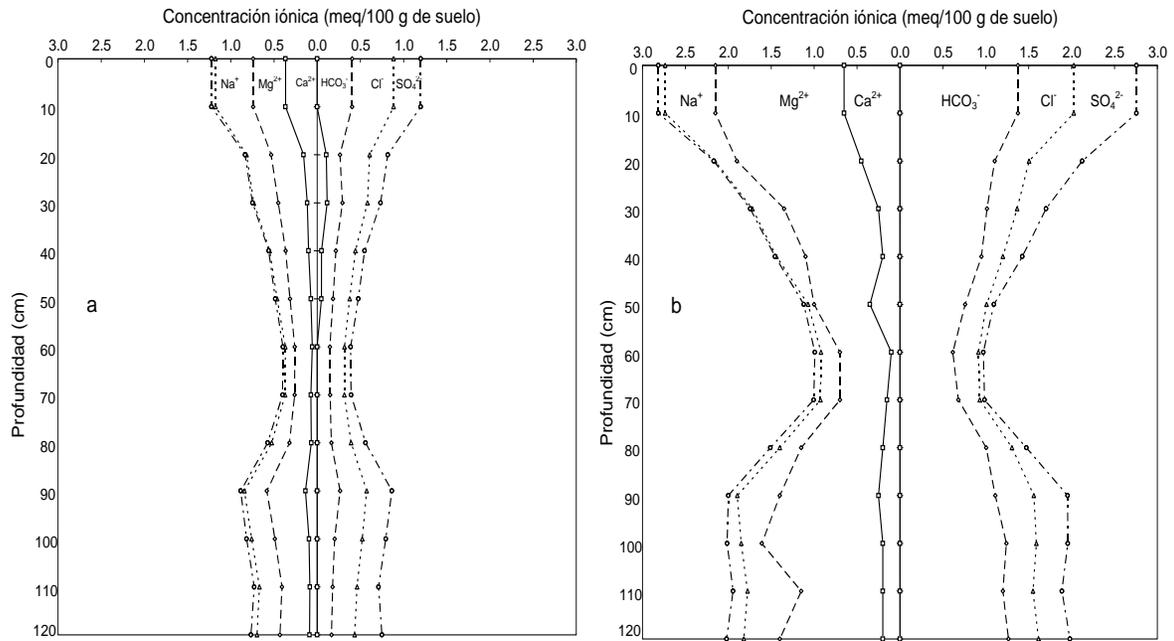


Figura 43. Distribución de sale solubles. Perfil 1, Laguna Totolcingo. a) Saturación; b) Relación 1:5.

Por último, como una observación particular, aquí se debe hacer mención que durante la perforación para la toma de muestras, para los estudios de salinidad y de la composición de las bases intercambiables, aquí en este perfil se encontró una capa de 0-80 cm de concentración y capas de  $\text{CaCO}_3\cdot\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaSiO}_3$  y  $\text{MgSiO}_3$ .

En el perfil de suelo 3 de distribución de sales solubles, Figura 44, se establece claramente que en este perfil la acumulación de sales se encuentra en las partes más superficiales (0-30 cm). Este perfil se localiza en una zona intermedia de la planicie lacustre de Totolcingo. La acumulación de sales en las partes superficiales de la zona lacustre se debe a procesos internos de evaporación.

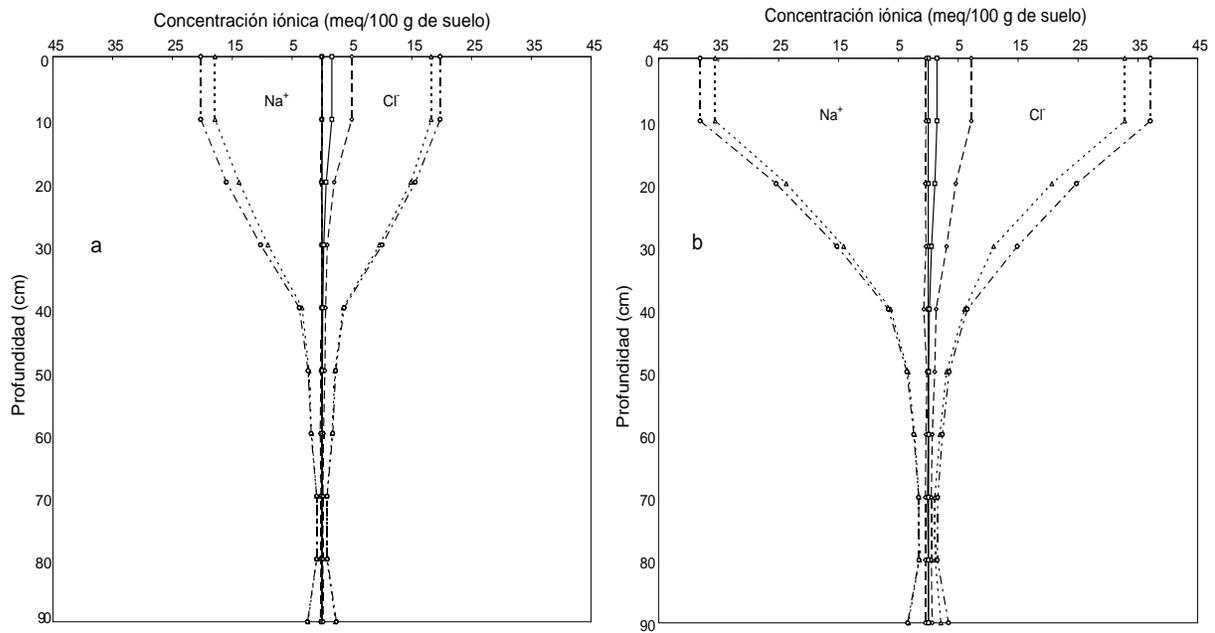


Figura 44. Distribución de sales solubles. Perfil 3, Laguna Totolcingo. a) Saturación; b) Relación 1:5.

El perfil de suelo 4 se encuentra en una zona lacustre de inundación (Figura 45). Cuando se llevó a cabo la perforación del perfil, la parte superficial se encontró endurecida, debido a procesos de precipitación del sistema salino  $\text{CaCO}_3\text{-CaSiO}_3$ . Esto se debe a procesos de desecamiento en esta zona. En una profundidad de 60-70 cm se encuentra la mayor concentración de sales.

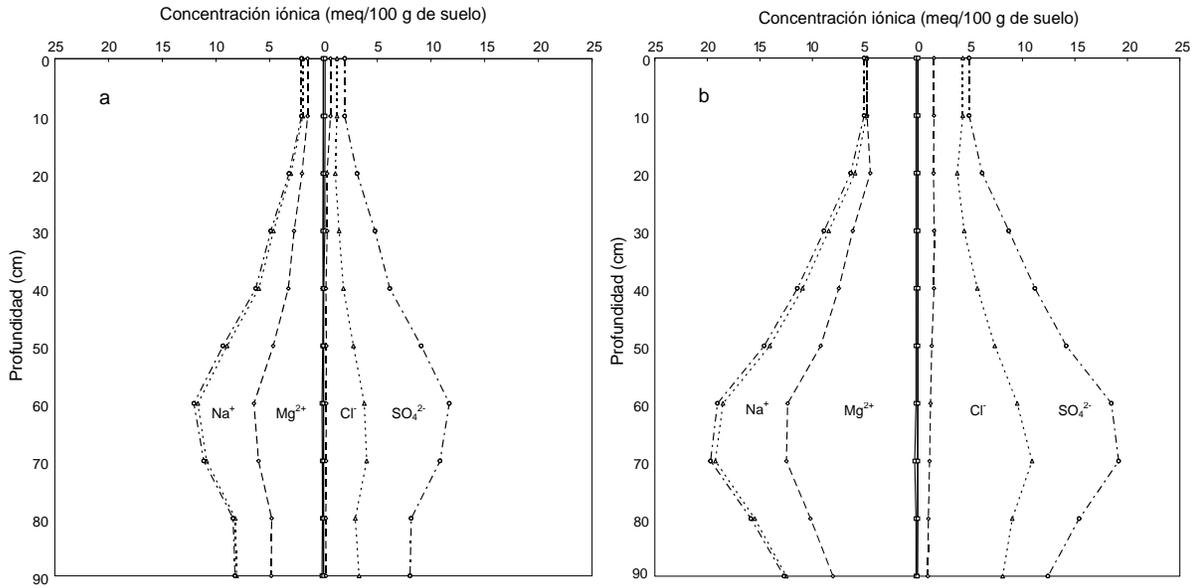


Figura 45. Distribución de sales solubles. Perfil 4, Laguna Totolcingo. a) Saturación; b) Relación 1:5.

En la Figura 46 se presenta el perfil de suelo 5. Este perfil se localiza en la zona de inundación. La distribución de sales en este perfil es prácticamente homogénea en profundidad.

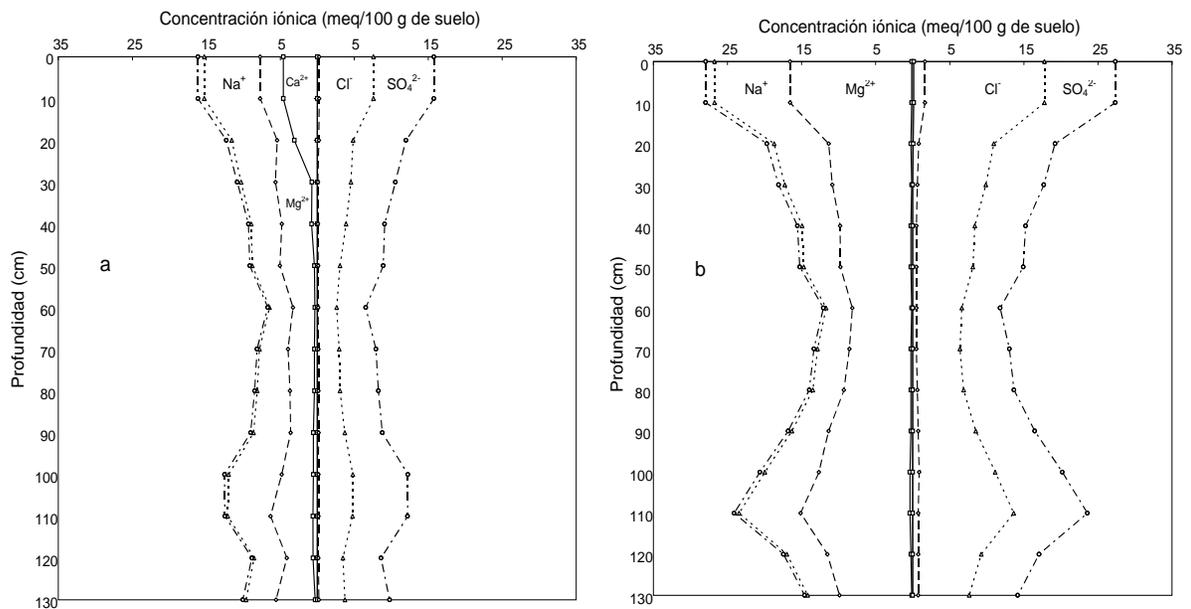


Figura 46. Distribución de sales solubles. Perfil 5, Laguna Totolcingo. a) Saturación; b) Relación 1:5.

### 7.3.2 Sales solubles en la zona lacustre de Tepeyahualco

En el perfil de suelo 2 de la zona lacustre de Tepeyahualco, Figura 47, se muestra la distribución de sales en una profundidad 0-300 cm. En este perfil es notable que se tenga una concentración de sales elevada 8-10 meq/100 g (relación 1:5). En una profundidad 250-300 cm la concentración de sales disminuye 4.0 meq/100 g.

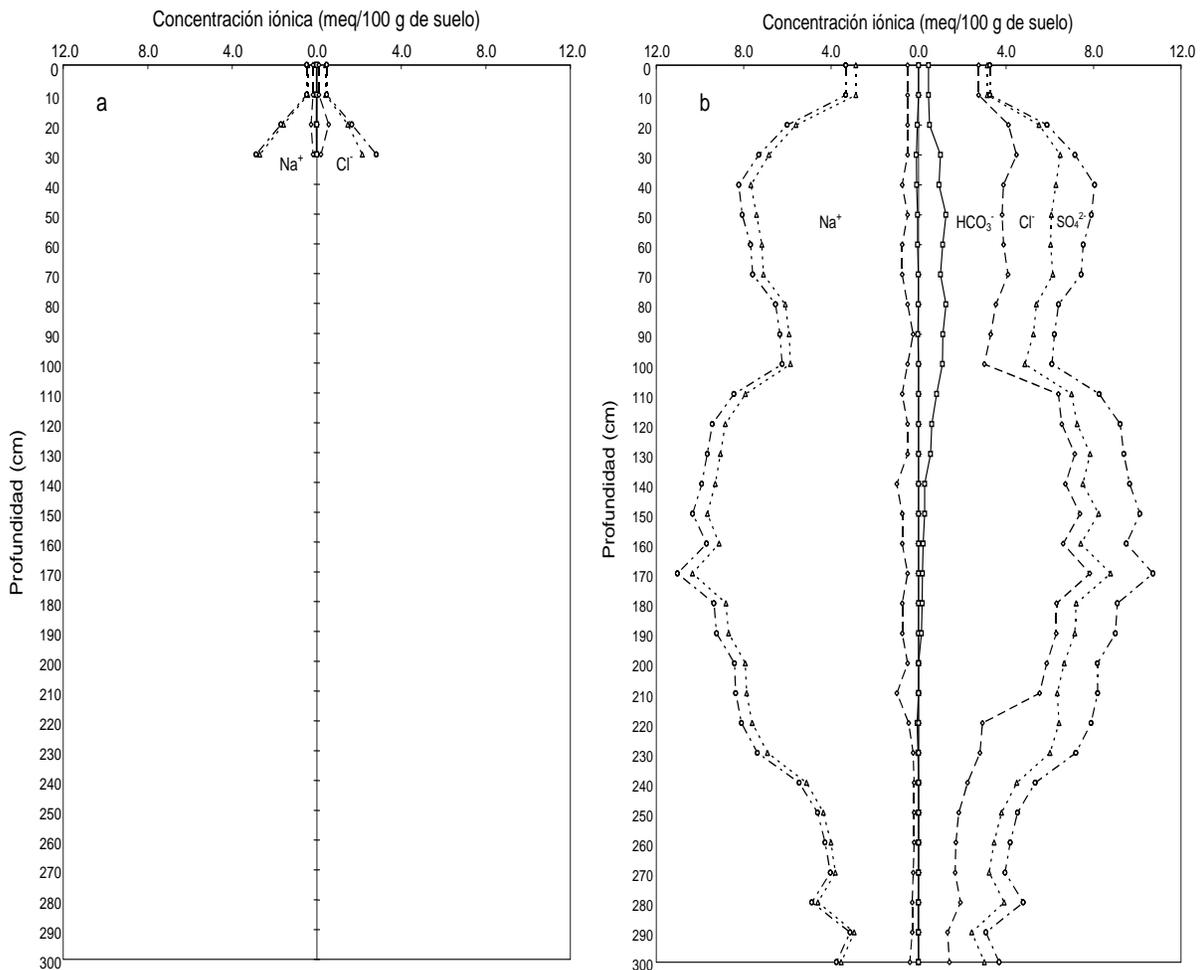


Figura 47. Distribución de sales solubles. Perfil 2, Laguna Tepeyahualco. a) Saturación; b) Relación 1:5.

Durante la determinación de sales solubles en el extracto de saturación, relación suelo-agua 1:~0.2-0.6, sólo se pudieron obtener extractos de suelo hasta una profundidad de 0-30 cm. Las partículas coloidales de las muestras de suelo de las

profundidades 30-300 cm, durante la extracción de sales en la relación suelo-agua equivalente al extracto de saturación, se dispersaron extraordinariamente, sellando por completo los poros y microporos por los que escurren hacia abajo el flujo de agua. Estos suelos se tornaron totalmente impermeables.

En el perfil de suelo 6 de la zona lacustre de Tepeyahualco (área de riego) se muestra la distribución de sales (Figura 48) en una profundidad de 0-130 cm. Los suelos de este perfil son franco-arcillosos. La mayor concentración de sales se encuentra en una profundidad de 100-130 cm.

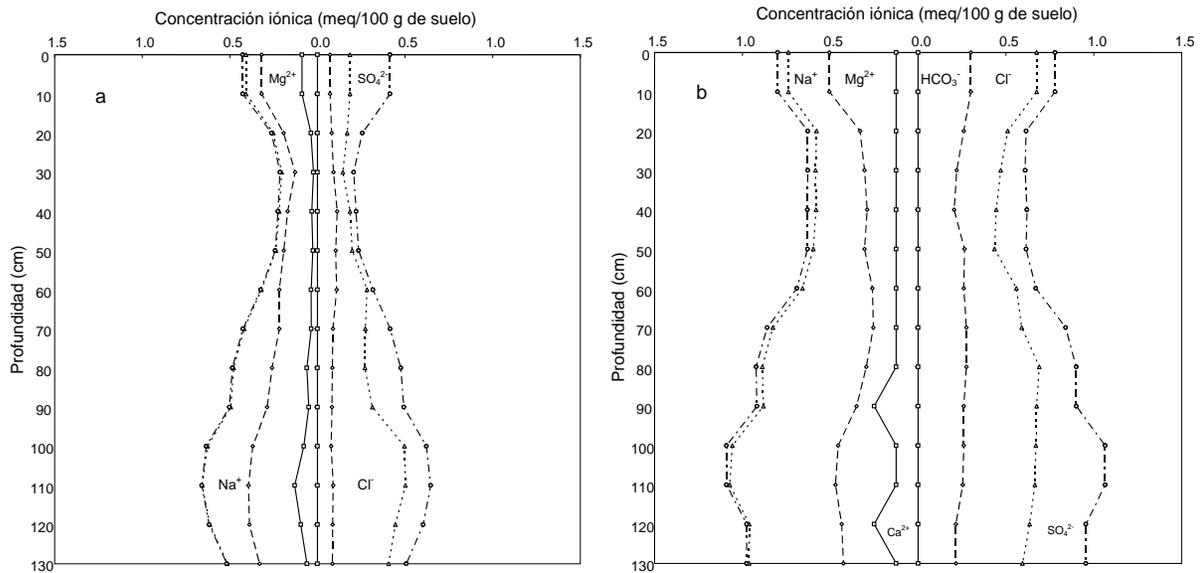


Figura 48. Distribución de sales solubles. Perfil 6, área de riego Laguna Tepeyahualco. a) Saturación; b) Relación 1:5.

### 7.3.3 Bases intercambiables en la zona lacustre de Totolcingo

Perfil de suelo 1, Figura 49, zona de estribaciones de explotación agrícola de la laguna de Totolcingo. El magnesio intercambiable ocupa un 60-70% de la suma de bases. La saturación tan alta de magnesio intercambiable en estos suelos esta en correspondencia con la migración de  $MgSO_4$  en zonas intermedias hacia la depresión de Totolcingo.

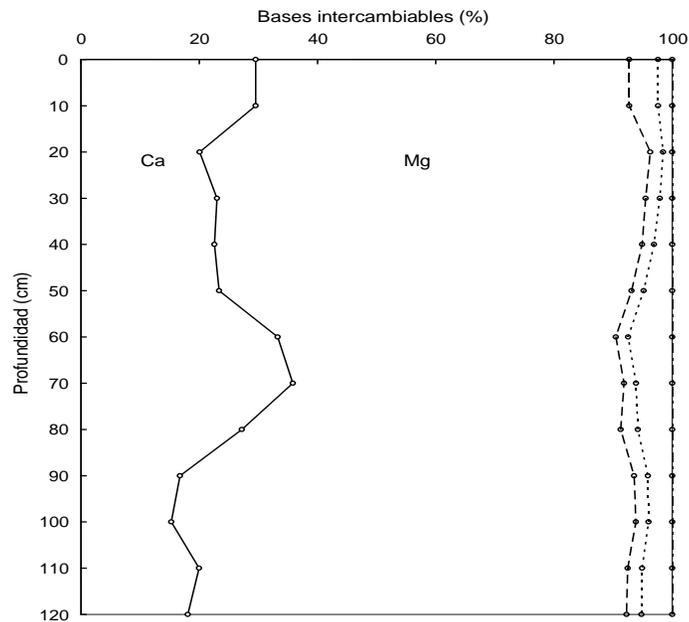


Figura 49. Distribución de bases intercambiables. Perfil 1, Laguna Totolcingo.

El perfil de suelo 3, Figura 50, de bases intercambiables corresponde a una zona de inundación de la zona lacustre de Totolcingo. La alta saturación de sodio intercambiable en una profundidad de 0-30-60 cm corresponde a una profundidad de ascensión capilar.

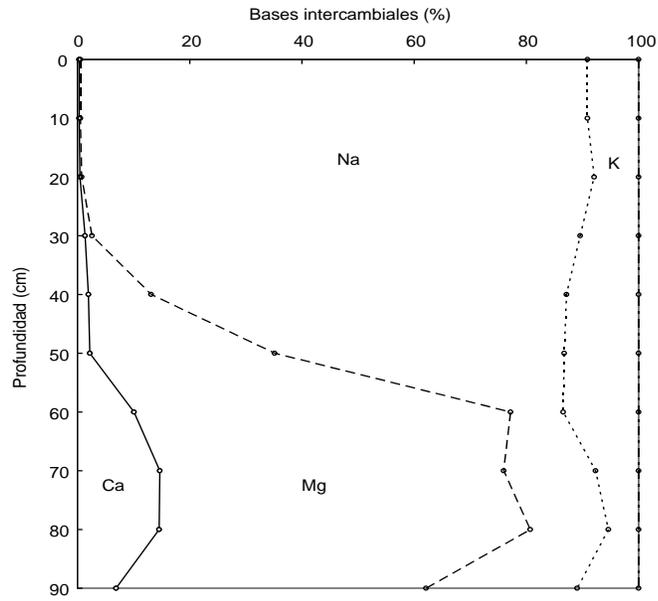


Figura 50. Distribución de bases intercambiables. Perfil 3, Laguna Totolcingo.

El perfil de suelo 4 de las bases intercambiables de la zona de cultivo de las estribaciones de la zona lacustre de Totolcingo se presenta en la Figura 51. En este perfil se muestra que el ion magnesio ocupa el mayor porcentaje de magnesio intercambiable (~80% de magnesio intercambiable).

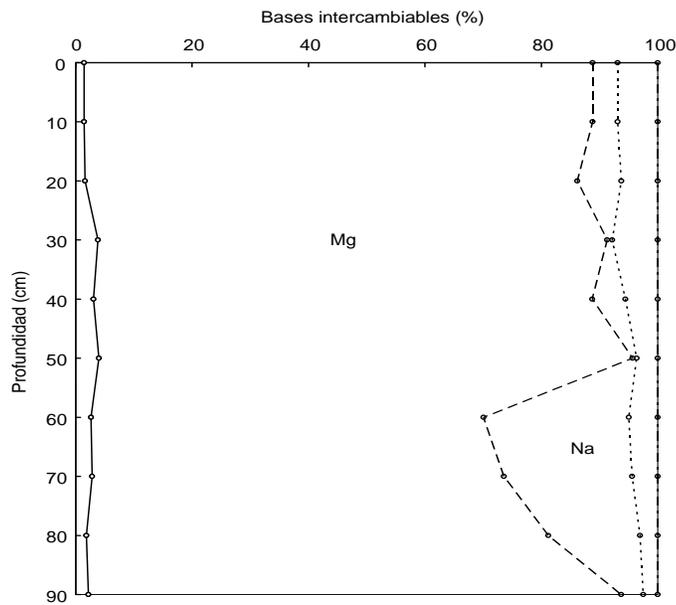


Figura 51. Distribución de bases intercambiables. Perfil 4, Laguna Totolcingo.

El perfil de suelo 5 de las bases intercambiables de la zona de inundación muy cercana a las estribaciones lacustres de áreas de cultivo, el magnesio intercambiable ocupa ~90% de saturación del total de bases intercambiables (Figura 52). La alta saturación de magnesio intercambiable se debe al intemperismo de cenizas volcánicas ricas en olivino y de minerales ferromagnesianos como la hiperstena.

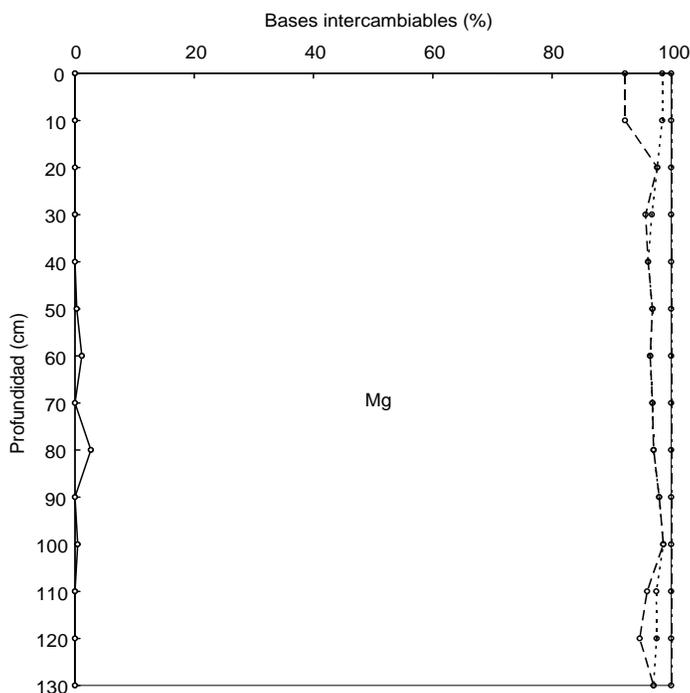


Figura 52. Distribución de bases intercambiables. Perfil 5, Laguna Totolcingo.

#### 7.3.4 Bases intercambiables en la zona lacustre de Tepeyahualco

El perfil de suelo 2 de las bases intercambiables de la zona lacustre (área más baja de la zona lacustre) de Tepeyahualco se muestra en la Figura 53. Aquí en este perfil el sodio intercambiable ocupa 80-90% de la suma de bases intercambiables. En una profundidad de 270-300 cm las bases intercambiables que predominan son el calcio, el magnesio y el sodio. El calcio y el magnesio intercambiable en estas profundidades se debe al intemperismo de calizas y dolomitas.

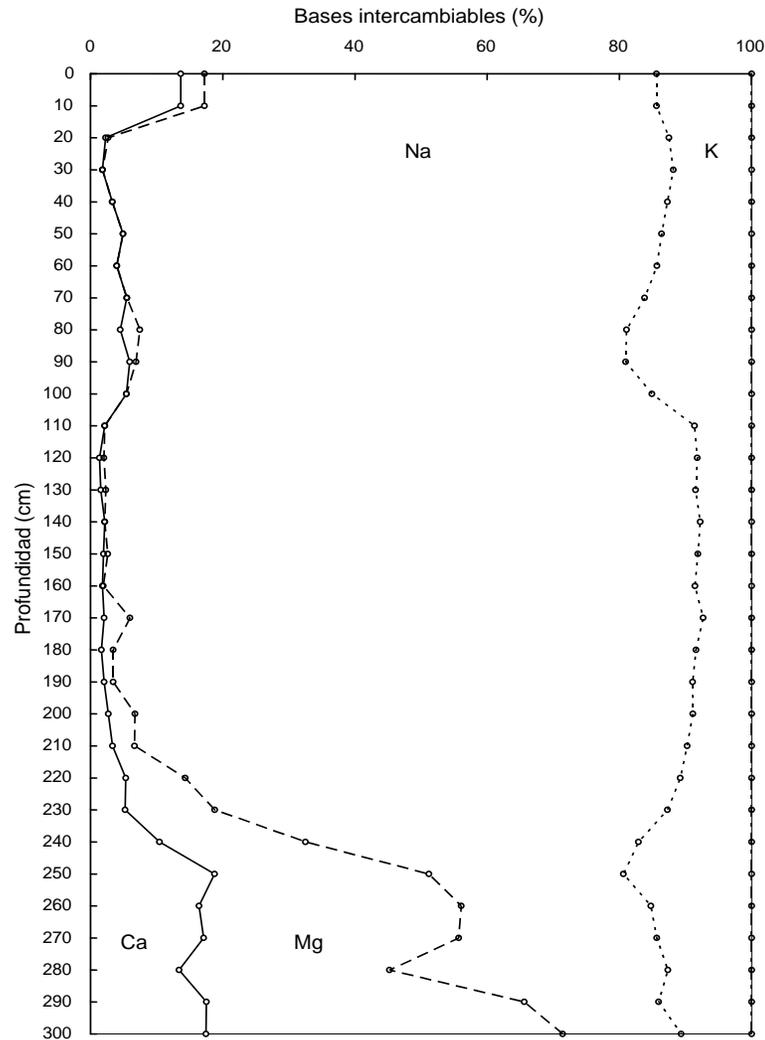


Figura 53. Distribución de bases intercambiables, calculadas de la relación 1:5. Perfil 2, Laguna Tepeyahualco.

El perfil de suelo 6 de las bases intercambiables se muestra en la Figura 54. Aquí en este perfil el calcio y el magnesio intercambiable ocupan un ~80.0% de bases intercambiables. La alta saturación de calcio y de magnesio intercambiables en este perfil, que corresponde a una zona de cultivo y que se encuentra colocada en las estratificaciones intermedias de la zona lacustre de Tepeyahualco, se debe al intemperismo de calizas y dolomitas de los afloramientos de calizas de la Sierra de Techachalco.

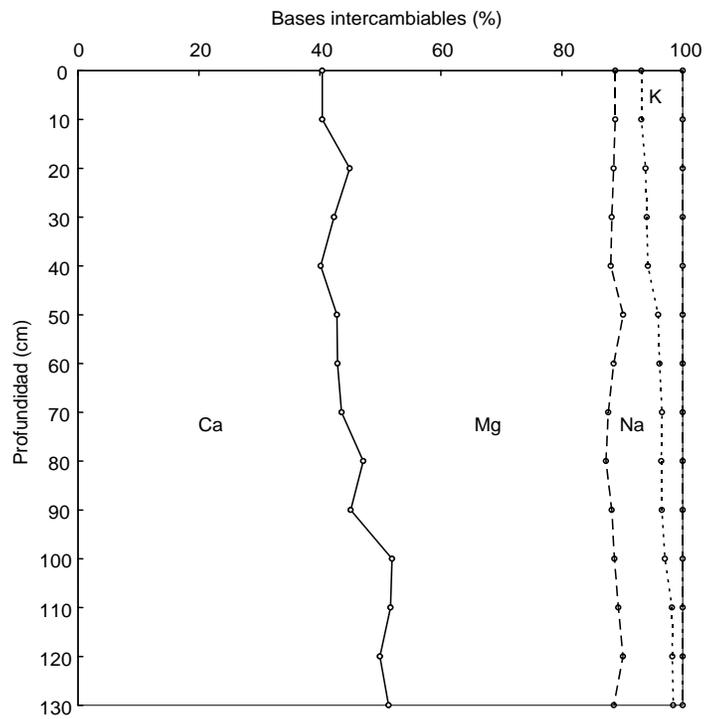


Figura 54. Distribución de bases intercambiables. Perfil 6, área de riego Laguna Tepeyahualco.

#### 7.4 Sierra Norte

Las muestras de agua que se tomaron durante los recorridos primavera y otoño 2008 en la Sierra Norte abarcaron las siguientes localidades: Acoculco-Chignahuapan-Zacatlán-Zacapoaxtla y Zaragoza. La Sierra Norte de Puebla se ubica geológicamente, en parte en el Eje Neovolcánico y en mayor proporción en la Sierra Madre Oriental.

La actividad tectónica que formó la Sierra Madre Oriental se intensificó al finalizar el Eoceno (Eguiluz *et al.*, 2000); al terminar el Mioceno, la formación de la Sierra Madre Oriental estaba terminada.

En la Sierra Norte se encuentra la caldera de Acoculco. López *et al.* (2009) mencionan que la caldera de Acoculco se encuentra en el interior de una caldera de mayor dimensión que corresponde a la caldera de Tulancingo. Aquí es necesario señalar lo siguiente: la caldera más antigua denominada Tulancingo, tiene 32.0 km de diámetro y se originó en el Plioceno. La más reciente es la caldera de Acoculco; que tiene un diámetro de 18.0 km; y ésta es del Pleistoceno.

Actualmente la caldera de Acoculco se considera un sistema hidrotermal (Lermo *et al.*, 2009). En los estudios de López *et al.* (2009) se identificaron los principales minerales hidrotermales como el cuarzo, pirita, arcillas (ilita, esmectita, caolinita, zeolitas (estilbita) y óxidos de hierro (hematita). Los minerales típicos del skarn también están presentes, tales como: wollastonita, granito, dioprida y epidota, además de sulfuros de cobre. Los minerales secundarios se encuentran principalmente reemplazando a los minerales primarios o rellenando poros, vetillas y oquedades.

Es muy importante señalar aquí que la asociación caolinita-pirita se observa a profundidades someras <200.0 m, lo que sugiere la interacción de gases geotérmicos con aguas subterráneas someras.

En los recorridos que se hicieron por la Sierra Norte para la toma de muestras de agua, con especial interés, se visitó la zona de la caldera de Acoculco, ya que en esta área se localizan las aguas ácidas de pH 2.5-5.5.

Sobre el carácter ácido del régimen físico-químico de las aguas de los diferentes manantiales y surgencias de la caldera de Acoculco, aquí esta parte se analizarán los orígenes de la acidez extrema de estas aguas. En lo que se refiere a los demás parámetros de evaluación de las aguas de la Sierra Norte, en su totalidad, los demás parámetros se evaluarán en conjunto todas las aguas de la Sierra Norte.

#### 7.4.1 Caldera de Acoculco

La caldera de Acoculco se ha estudiado con fines de prospección geotérmica, y también se ha señalado que en esta caldera se tiene la presencia de una superficie muy extensa de alteración hidrotermal (Figura 55). En esta caldera se tiene la presencia de manantiales con aguas ácidas y descargas de gases, que algunas veces intoxican y matan a los animales, cuando estos beben agua de estos manantiales.

Sobre el origen de las aguas ácidas de la zona de Alcaparroza (caldera de Acoculco), en el corte litológico, pozo EAC-1, 0.0-2000.0 m, que llevó a cabo la CFE en búsqueda de fuentes geotérmicas se presenta, que en una profundidad superficial 0.0 a 300.0 m, se tiene abundantes reservas de pirita. En la Figura 55 se muestra de manera esquemática la gran zona de alteración hidrotermal.

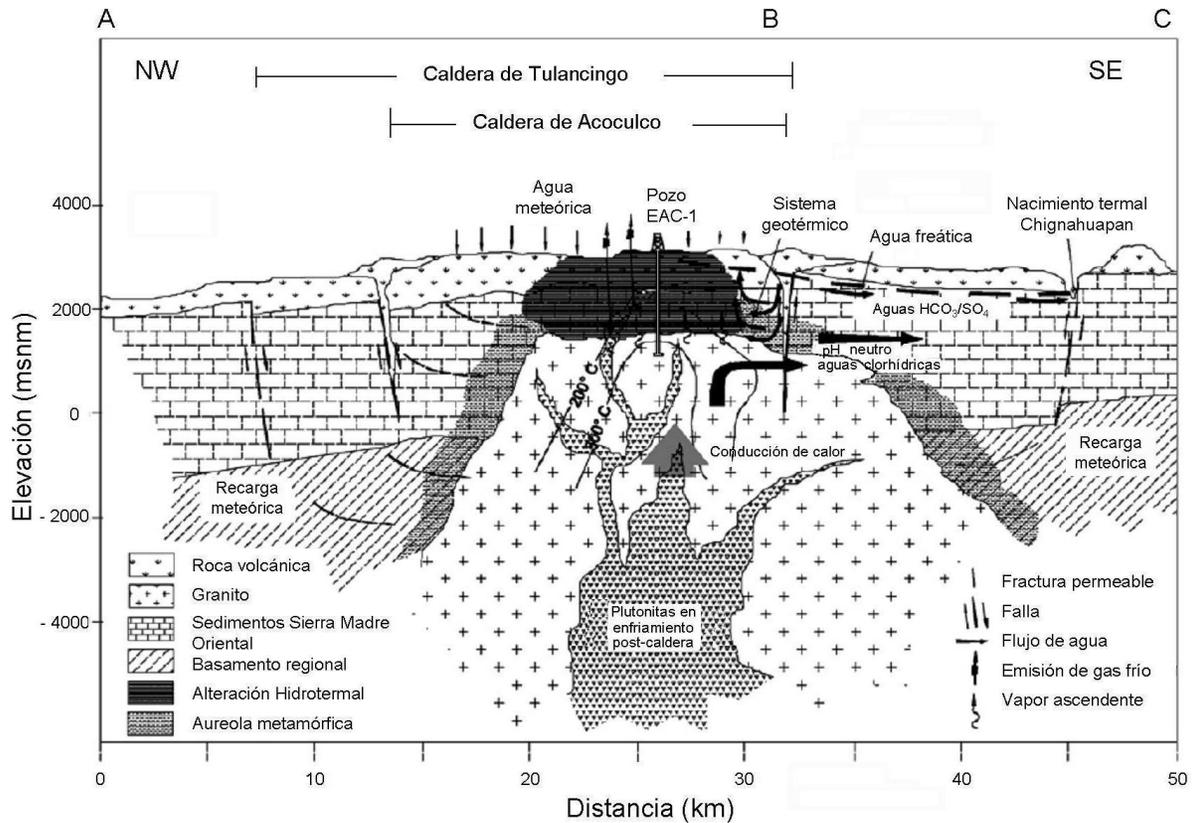


Figura 55. Modelo geológico esquemático del complejo caldera de Tulancingo-Acozulco y su sistema de desarrollo geotérmico con base en datos geológicos, gravimétricos y magnéticos.

En la Figura 55 claramente se señala que las aguas meteóricas (pluviales) circulan hasta una profundidad considerable 0.0-300.0 m y escurren dentro y sobre las calizas del cretácico.

Es sobreentendido que en los espesores ricos en pirita ( $\text{FeS}_2$ ), durante la longitud de tiempo geológico Pleistoceno-Holoceno, en estos espesores piríticos se hayan encontrado soluciones termales ricas en sulfatos. En general se cuenta con un potente espesor saturado, ya que las precipitaciones actuales en la zona son 1000 mm en las partes altas y en las partes bajas son de 600 mm.

En el trabajo de López *et al.* (2009) que se intitula “Hydrothermal activity in the Tulancingo-Acoculco Caldera Complex, central Mexico: Exploratory studies” sobre las alteraciones hidrotermales se establece lo siguiente:

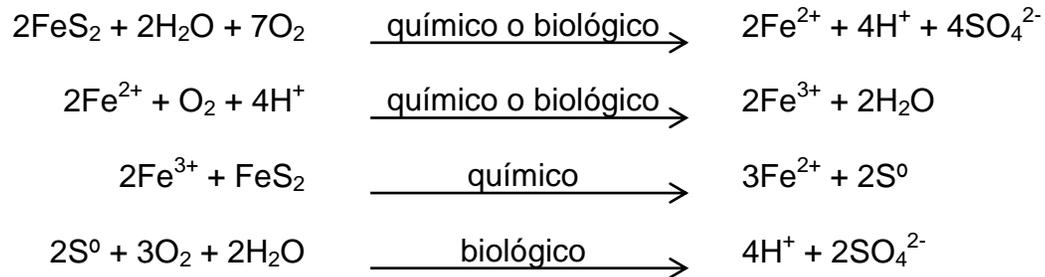
Basados en los estudios minerales hidrotermales se distinguen cuatro zonas:

1. Una zona somera (< 200.0 m de profundidad) de rocas ácidas alteradas que contienen caolinita-pirita-calcita. Los carbonatos pueden estar asociados con los pulsos hidrotermales.
2. Una zona intermedia (165.0-780.0 m de profundidad) de rocas argílicas alteradas que contienen esmectita + illita + cuarzo + calcita, con aguas típicas de reacción de pH neutro.
3. Una zona profunda (780.0-1660.0) de alta temperatura, en la mineralogía del skarn se contiene wollastonita + garnet-dioprido, y
4. Una zona de alteración retrógrada: enfriamiento del plutón y circulación de aguas de temperaturas más bajas, posiblemente meteóricas y oxigenadas; un skarn que contiene: cuarzo + epidota-calcita-clorita-pirita, sulfuros de cobre (calcopirita, pirrotita, idrita). Dentro del sistema hidrotermal, se tiene la depositación de minerales sulfurosos como consecuencia de un estado de depósitos de skarn.

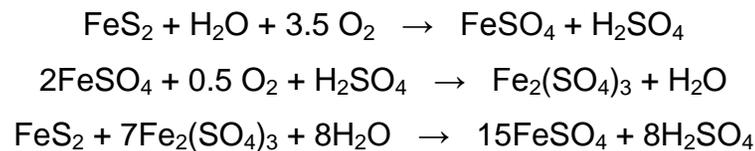
Aquí se debe señalar que la pirita y la caolinita son muy comunes en las profundidades superficiales < 200.0 m.

Oxidación de la pirita. Como las aguas meteóricas (pluviales) que saturan en alguna medida el espesor de 0.0-200.0 m de profundidad contienen fracciones diferentes de oxígeno disuelto, entonces como consecuencia, es estos espesores tienen ocurrencia procesos de oxidación de la pirita. Los procesos de oxidación de la pirita son tanto químicos como biológicos (Nordstrom, 1982).

La descripción de los procesos de oxidación de la pirita es la siguiente:



Estas ecuaciones se pueden escribir en sus formas generales como sigue:



La gran cantidad de surgencias y manantiales de aguas ácidas pH 2.5-5.5 que se encuentran en la zona de Alcaparroza se debe a las diferencias en las cargas piezométricas en los espesores saturados del perfil litológico de 0.0-200.0 m.

Por último, se señala aquí, el papel fundamental que desempeñan las bacterias *T. Thiooxidans* en los procesos de oxidación de la pirita.

*T. Thiooxidans*. Estos microorganismos son obligatoriamente autótrofos, y es necesario remarcar que son muy tolerantes a una acidez extrema. El pH óptimo para llevar a cabo la oxidación es pH = 2.0-3.5 y su crecimiento generalmente cesa arriba de pH = 5.5. Es un organismo muy común en ambientes geológicos.

Estos microorganismos son frecuentemente encontrados en medios ambientes que tienen condiciones muy ácidas debido a la oxidación de los sulfuros.

#### 7.4.2 Composición iónica de las aguas

En la Sierra Norte, las aguas superficiales con concentraciones iónicas altas son principalmente nacimientos de agua, que se encuentran en el área geotérmica caracterizada por el hidrotermalismo y fuentes de agua azufradas. Las fuentes de agua azufradas de acuerdo con Camprubí *et al.* (2003) se deben al contacto del agua con depósitos epitermales y hidrotermalismo al contacto del agua con fuentes de calor provenientes de la actividad magmática que circulan por las fallas o zonas de fractura provocadas por la actividad volcánica.

Las fuentes termales son los nacimientos que se encuentran en la caldera de Acoculco y vecindades. Estos son: 1. Nacimiento termal El Pinal en Jicolapan y 2. Nacimiento termal Barranca Chignahuapan. Los nacimientos sulfurosos se encuentran a unos kilómetros del poblado de Pueblo Nuevo, estos son: Los azufres 1, 2, 3, 4 y 5.

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

6. Clorhídricas	Cl/SO <sub>4</sub>	> 2.0
7. Sulfático-clorhídricas	Cl/SO <sub>4</sub>	= 1.0-2.0
8. Clorhídrico-sulfáticas	Cl/SO <sub>4</sub>	= 0.2-1.0
9. Sulfáticas	Cl/SO <sub>4</sub>	< 0.2
10. Sulfático-sódicas	HCO <sub>3</sub> /Cl+SO <sub>4</sub>	= 2.0

El número de muestra de agua con diferentes tipos de quimismo que se tienen en la población de aguas de la Sierra Norte se clasifican como sigue: 1. De composición clorhídrica, 31 muestras, 2. De composición sulfático-clorhídrica, seis muestras, 3. De composición clorhídrico-sulfática, cuatro muestras, 4. De composición sulfática, tres muestras y 5. De composición sulfático sódica, una muestra. Las aguas sulfáticas son las aguas que se encuentran en los nacimientos de los azufres de Pueblo Nuevo.

### 7.4.3 Distribución de los cationes y aniones en las aguas

En la Figura 56 se presenta la distribución de cationes y de aniones en las aguas de la Sierra Norte registrada en primavera y en otoño 2008. La figura indica que a lo largo de todas las estaciones de muestreo, 21 de ellas tienen valores de  $\text{Ca}/\text{Mg} < 1.0$ . Estas aguas son de carácter magnésico.

Las aguas de la Sierra Norte son bicarbonatadas, con excepción de las aguas de la caldera de Aocolco.

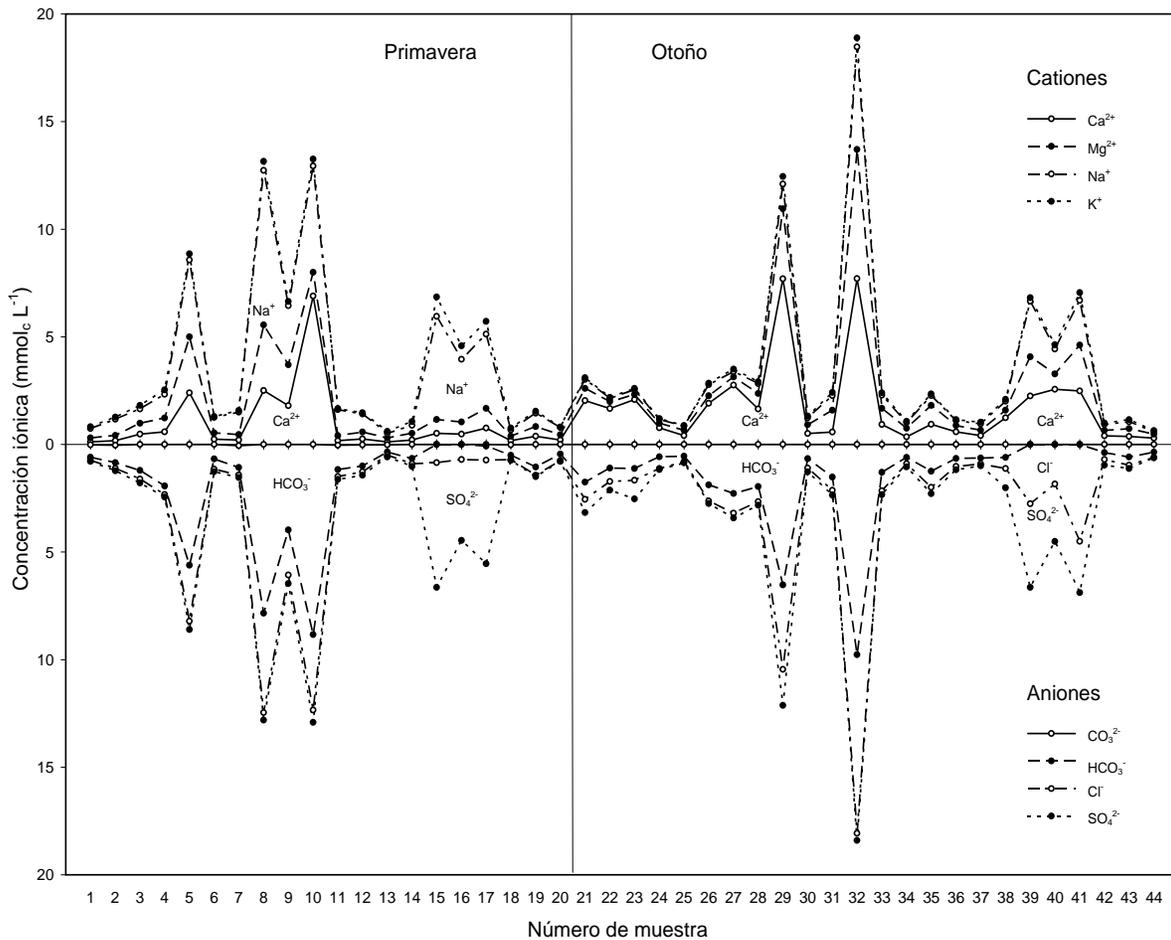


Figura 56. Diagrama de distribución iónica en las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.

#### 7.4.4 Distribución de concentraciones: conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y concentración catiónica (en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) en las aguas

Como se ha mencionado, la calidad de las aguas se determina por la concentración total electrolítica y por la composición relativa de los diferentes iones. En las Figuras 57 y 58 se presenta la distribución de frecuencias de las diferentes aguas de la Sierra Norte con respecto a su conductividad eléctrica y con respecto a su concentración de cationes.

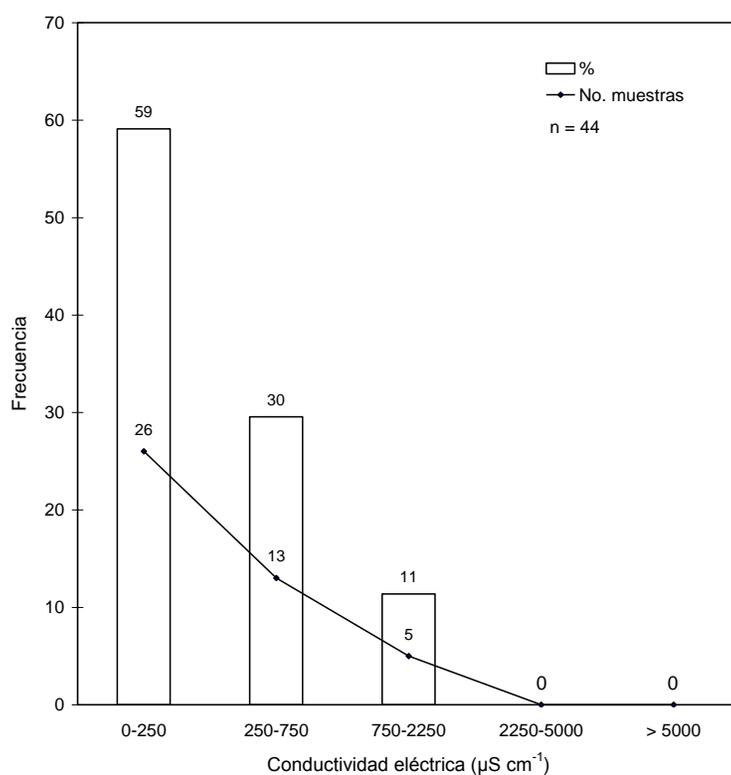


Figura 57. Distribución de frecuencias de los valores de la conductividad eléctrica de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.

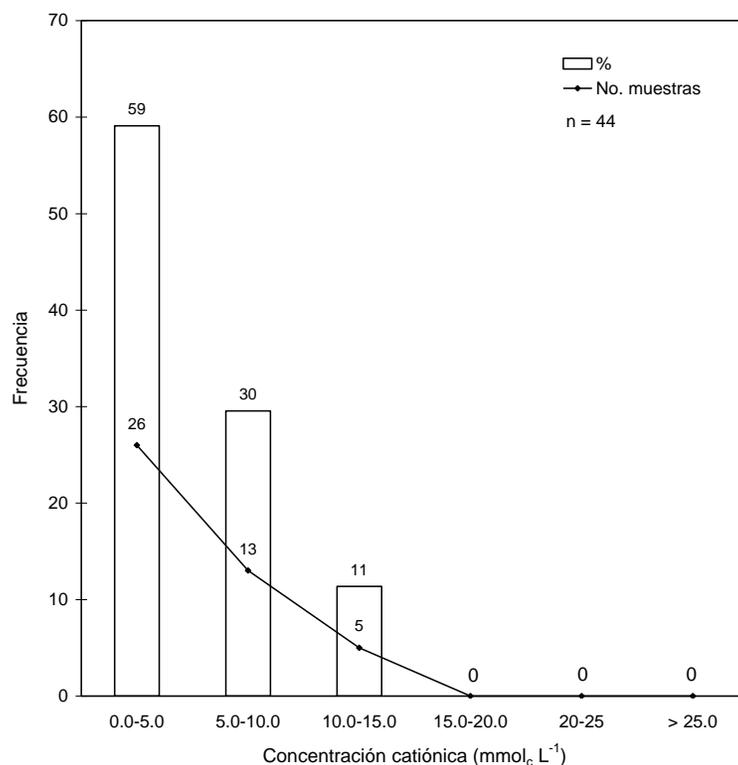


Figura 58. Distribución de frecuencias de los valores de la concentración de cationes de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.

De acuerdo con los rangos de los valores de la conductividad eléctrica establecidos por Richards (1990), para considerar la calidad de las aguas de riego, las aguas de la Sierra Norte se clasifican como sigue: 1. Aguas con conductividad eléctrica < 250  $\mu\text{S cm}^{-1}$  o C1, en 26 muestras; 2. Aguas con conductividad eléctrica de 250-750  $\mu\text{S cm}^{-1}$  o C2, en 13 muestras; 3. Aguas con conductividad eléctrica de 750-2250  $\mu\text{S cm}^{-1}$  o C3, en 11 muestras.

Por último, de acuerdo con los rangos de valores de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) las aguas de la Sierra Norte se clasificaron como sigue: 1. Aguas con concentración < 5.0  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ , en 26 muestras; 2. Aguas con concentración de 5.0-10.0  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ , en 13 muestras; 3. Aguas con concentración de 10.0-15.0  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ , en cinco muestras.

#### 7.4.5 Relación entre las conductividades eléctricas determinadas experimentalmente y las determinadas teóricamente

En los trabajos de evaluación y caracterización de las aguas, tanto superficiales como subterráneas, se ha considerado que al medir la conductividad eléctrica en las soluciones acuosas se puede relacionar, esta medición, con los sólidos disueltos en estas aguas (en  $\text{mg L}^{-1}$ ). Por eso es muy importante contar con mediciones experimentales de la conductividad eléctrica (en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ), con un alto nivel de confiabilidad; es decir en qué medida, las mediciones experimentales de la conductividad eléctrica (en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ), corresponden estos con los valores teóricos de la conductividad eléctrica (en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) de estas mismas aguas.

Con este objetivo, se procedió a establecer la relación funcional  $CE_{\text{Teórica}} = f\alpha CE_{\text{Experimental}}$ . Para este efecto, se calculó la conductividad eléctrica teórica en  $\mu\text{S cm}^{-1}$  para cada ion que se tiene en las muestras de agua, de acuerdo con lo establecido por APHA (Eaton *et al.*, 1995). El coeficiente  $\alpha = 1.1704$  de la relación funcional  $CE_{\text{Teórica}} = f\alpha CE_{\text{Experimental}}$  corresponde a aguas del tipo bicarbonatado.

De acuerdo con la Figura 59, se concluye que las determinaciones experimentales de la conductividad eléctrica de las muestras de agua de la Sierra Norte están correctamente determinadas.

Es necesario señalar que las sales solubles que se encuentran disociados en las aguas superficiales y subterráneas están formando iones independientes diferentes. Los fenómenos de disociación ocurren de acuerdo con las leyes de disociación electrolítica. Es así que los valores de la conductividad eléctrica de distintas soluciones salinas (aguas) son proporcionales a las concentraciones iónicas de estas mismas soluciones.

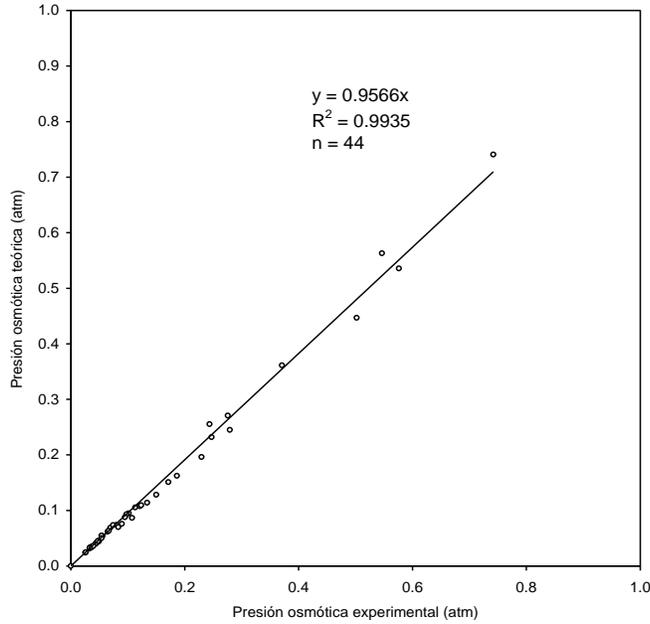


Figura 59. Relación funcional entre la conductividad eléctrica teórica y la experimental, en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.

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

Como se ha señalado por diferentes investigadores (Richards, 1990; Jurinak y Suarez, 1990; Velázquez, 2001 y Mendoza, 2009) en investigaciones específicas sobre numerosas determinaciones analíticas de la conductividad eléctrica y su relación con la cantidad en peso de los iones disociados, se ha establecido que las mediciones de conductividad eléctrica son directamente proporcionales a las masas moleculares disociadas. Aquí es necesario señalar que las mediciones de la conductividad eléctrica (CE) dependen del número de iones disociados en la solución y esta no depende de las masas de los iones disociados. De ahí que la concentración en  $\text{mg L}^{-1}$  si dependa de ambos, es decir, depende del número de iones y de sus masas. También a su vez se debe señalar que, la relación funcional  $\text{mg L}^{-1} = f_a \text{ CE}$ , en su proporcionalidad, la pendiente de la recta depende del tipo de salinidad.

En la Figura 60 se presenta la relación funcional entre las concentraciones de las sales solubles de las aguas de la Sierra Norte y sus valores correspondientes de la conductividad eléctrica:  $\text{mg L}^{-1} = f\alpha \text{ CE}$ . El valor de la pendiente  $\alpha$  encontrada, para las aguas de la Sierra Norte, es de 0.696, que corresponde a aguas con valores considerables en los contenidos de bicarbonatos.

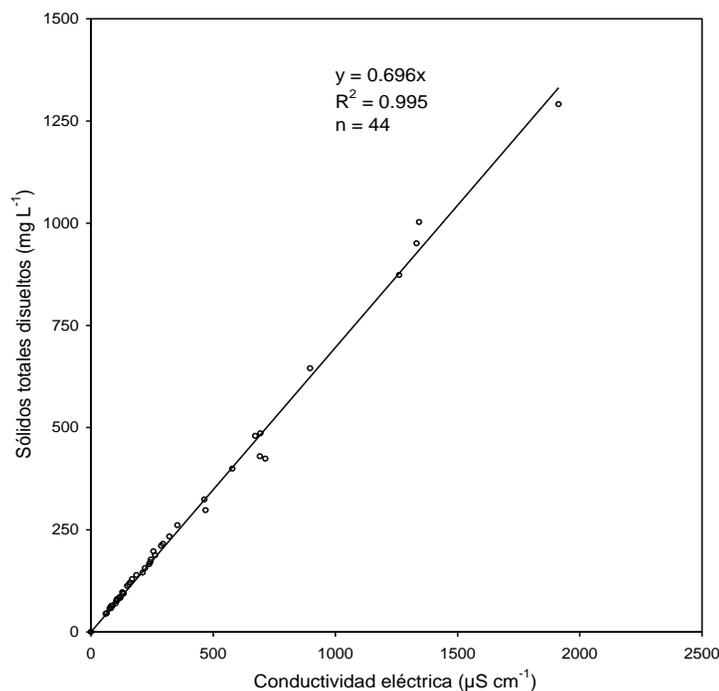


Figura 60. Concentración de sales expresadas en  $\text{mg L}^{-1}$  y su relación con la conductividad eléctrica en  $\mu\text{S cm}^{-1}$  de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.

#### 7.4.7 Relación de la suma de cationes (en $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ) con la conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$ )

Entre las características de las soluciones acuosas salinas (aguas superficiales y subterráneas) está el hecho que la conductividad eléctrica de las soluciones acuosas expresadas en  $\mu\text{S cm}^{-1}$  está en una función proporcional a la concentración. Conocer los valores de la relación funcional de cationes o de aniones  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1} = f\alpha \text{ CE}$ , es

muy importante ya que, en las determinaciones analíticas, las sumas de cationes y la suma de aniones, éstas deben ser aproximadamente iguales, tomando en cuenta, obviamente, los porcentajes de error permitidos (Richards, 1990, Eaton *et al.*, 1995).

En la Figura 61 se presentan los valores de la relación funcional  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1} = f a \text{ CE}$ , para cationes de las aguas de la Sierra Norte. El valor de pendiente es de 0.0099.

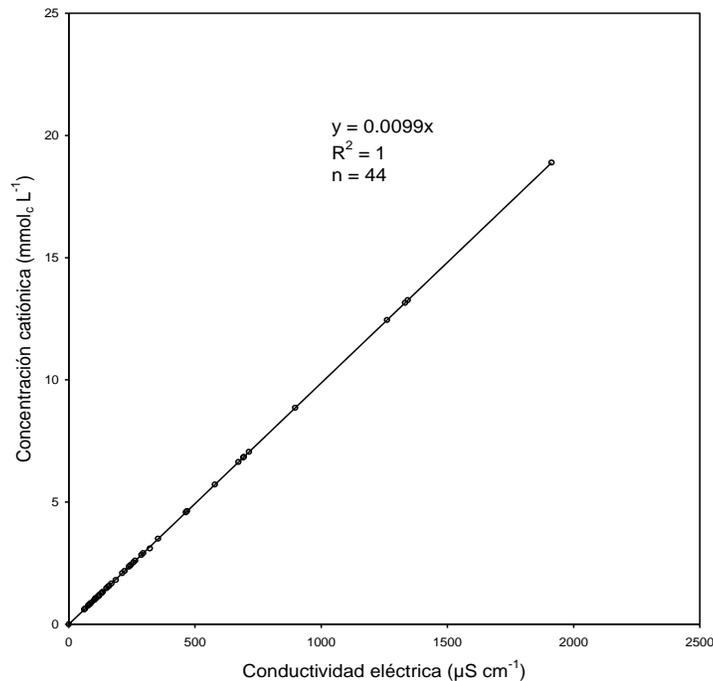


Figura 61. Relación de la suma de cationes en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  de las sales solubles con respecto a la conductividad eléctrica en  $\mu\text{S cm}^{-1}$  de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.

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

El efecto osmótico de las soluciones acuosas (aguas superficiales y subterráneas) y extractos de suelo de los suelos salinos es proporcional a su concentración de solutos.

La presión osmótica ( $\pi$ ), de una disolución, es la presión que se requiere para detener la osmosis, y ésta se expresa en atmósferas. La fórmula para determinar la presión osmótica teórica se presenta como sigue:

$$\pi = cRT$$

Donde:

T = Es la temperatura absoluta (K)

c = Es la molaridad de la solución ( $\text{mol L}^{-1}$ )

R = Es la constante de los gases (0.082057 L atm/K mol)

La presión osmótica de las soluciones acuosas de las aguas naturales también se puede determinar de acuerdo con:

$$\text{STD} = 0.696 \text{ CE} \quad \text{y} \quad \pi = 0.0004 \text{ CE}$$

$$\pi = 0.0004/0.696 \text{ STD}$$

Donde:

STD =  $\text{mg L}^{-1}$  de solutos en el agua.

0.696 = Pendiente de la recta que se obtiene numéricamente al relacionar  $\text{STD} = f_a \text{ CE}$  en una población de muestras de agua.

0.0004 = Pendiente de la recta que se determina numéricamente al relacionar  $\pi = f_a \text{ CE}$ .

CE = Conductividad eléctrica determinada numéricamente en una población de muestras de agua (en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ).

$\pi$ = Presión osmótica (en atm) de las soluciones acuosas de una población de muestras de agua.

En la Figura 62 se presenta la relación funcional  $\pi = f_a$  CE. El valor numérico de la pendiente es de 0.0004.

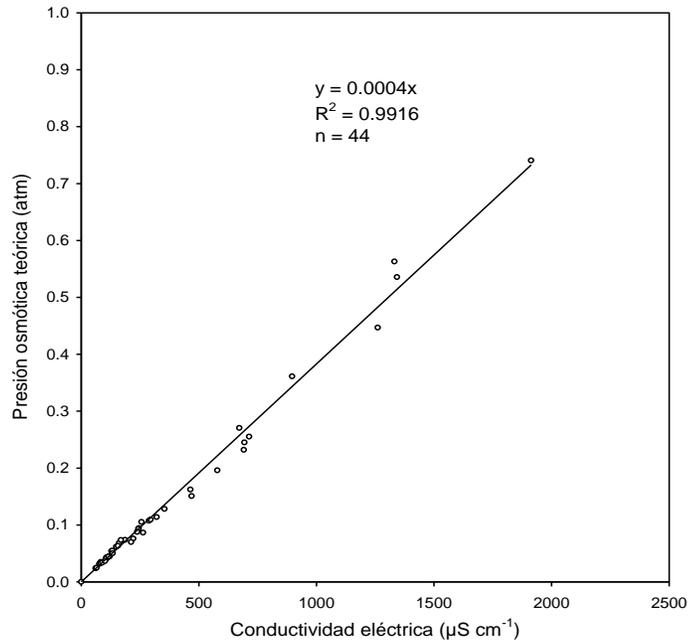


Figura 62. Relación entre la  $\pi_{\text{Teórica}}$  en atm y la conductividad eléctrica en  $\mu\text{S cm}^{-1}$  de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.

En la Figura 63 se presenta la relación funcional  $\pi_{\text{Teórica}} - \pi_{\text{Experimental}}$  y es de 0.9566, valor que corresponde a aguas con cantidades considerables de iones bicarbonato.

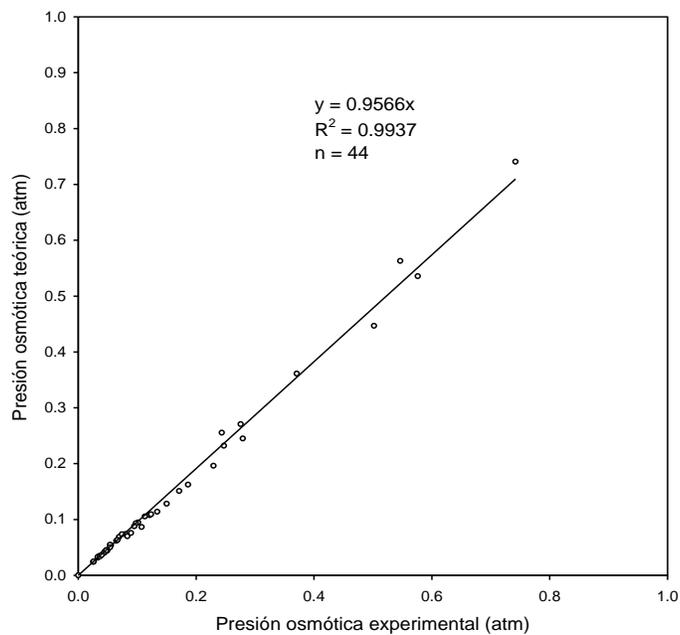


Figura 63. Relación entre la  $\pi_{\text{Teórica}}$  y la  $\pi_{\text{Experimental}}$  en atm de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.

#### 7.4.9 Relación entre la concentración iónica ( $\text{mmol-ion L}^{-1}$ ) y la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )

En la Figura 64 se presenta la relación de la concentración iónica con la conductividad eléctrica de las aguas de la Sierra Norte, cuyo coeficiente  $\alpha = 0.0157$  permite estimar sus presiones con base en la conductividad eléctrica.

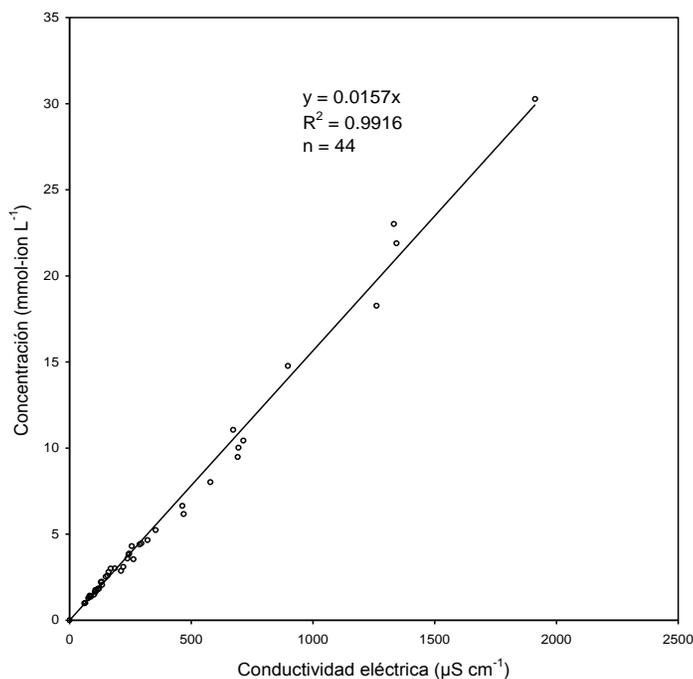


Figura 64. Relación entre los  $\text{mmol-ion L}^{-1}$  y la conductividad eléctrica en  $\mu\text{S cm}^{-1}$  de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.

#### 7.4.10 Clasificación de las aguas de la Sierra Norte, de acuerdo con la relación de adsorción de sodio (RAS)

Como se ha mencionado en líneas anteriores la sodicidad se refiere a la prevalencia en las soluciones de las 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.

La sodicidad se estima con los siguientes criterios: el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la relación de adsorción de sodio (RAS).

En las Figuras 65 y 66 se presenta la relación  $\text{RAS}_{\text{aj}}\text{-RAS}$  y  $\text{RAS}^0\text{-RAS}$ .

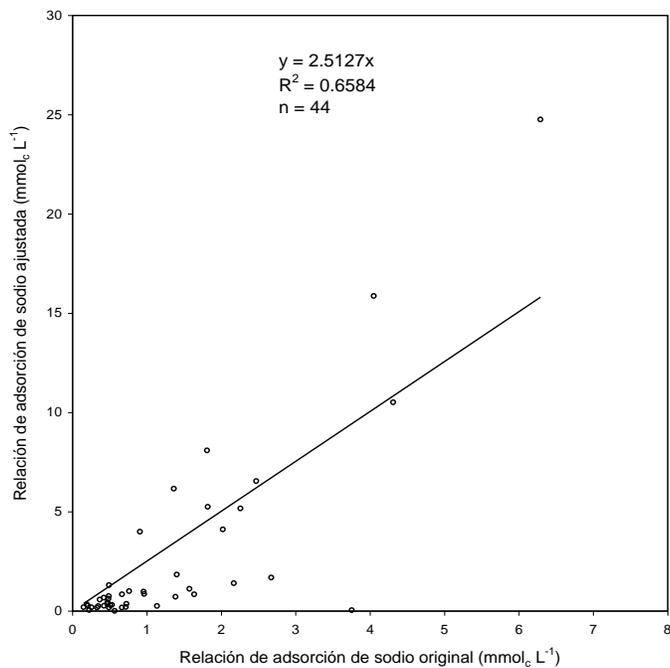


Figura 65. Relación entre los valores de la RAS ajustada y la RAS original de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.

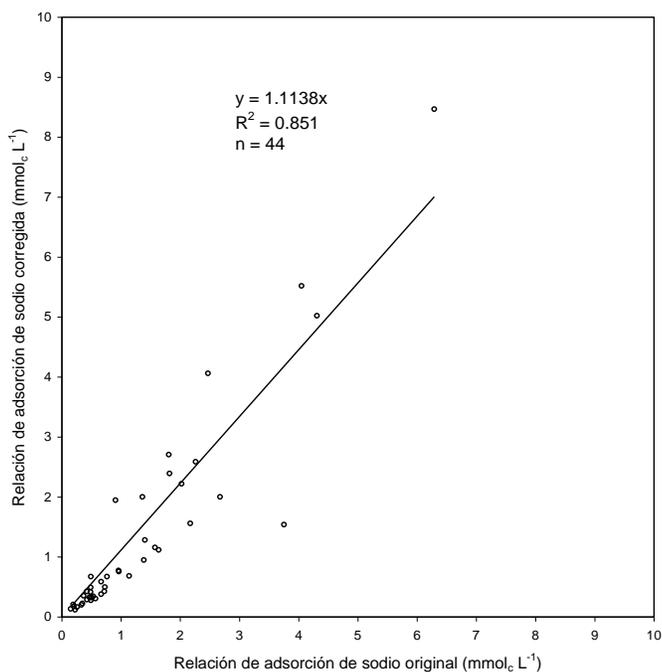


Figura 66. Relación entre los valores de la RAS corregida y la RAS original de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.

En la Figura 67 se ilustra cómo quedan distribuidas, en el diagrama de Richards (1990), las aguas de la Sierra Norte, de acuerdo con los valores numéricos de la relación de adsorción de sodio (RAS) en sus tres conceptualizaciones.

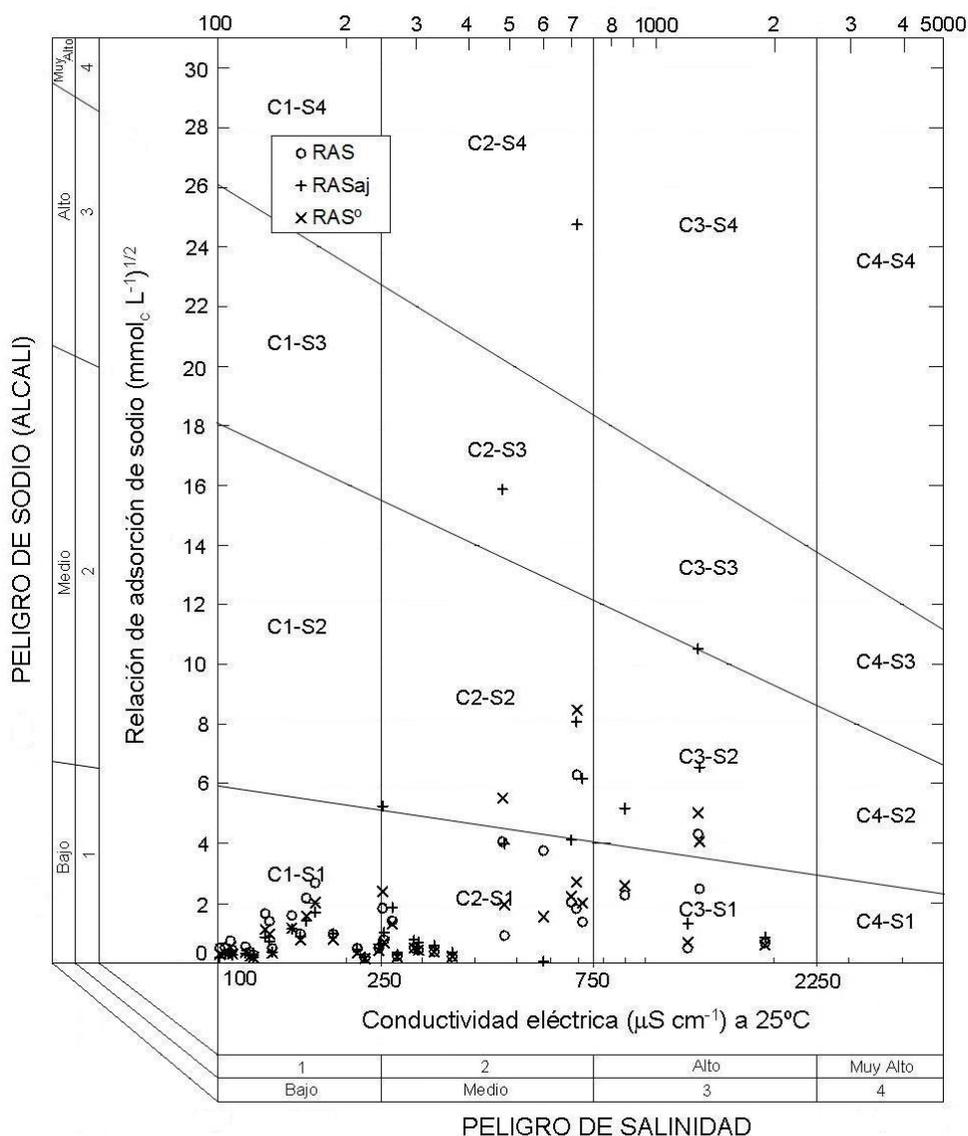


Figura 67. Clasificación de las aguas mediante el diagrama de Richards de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.

En el Cuadro 17 se presenta la clasificación de las aguas de la Sierra Norte de acuerdo con sus valores de RAS y CE. Aquí se toman en cuenta las variaciones en

las concentraciones de los iones de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y de magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) durante los procesos de precipitación o de disolución de la calcita.

Cuadro 17. Síntesis de la clasificación de las aguas de la Sierra Norte con base en el diagrama de Richards. Estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.

Formulaciones de RAS	Clasificación de acuerdo al diagrama de Richards (1990)						
	C1-S1	C2-S1	C2-S2	C2-S3	C2-S4	C3-S1	C3-S2
RAS							
Muestras	26	12	1	-	-	5	-
RAS <sub>aj</sub>							
Muestras	26	10	1	1	1	3	3
RAS <sup>o</sup>							
Muestras	26	12	1	-	-	5	-

#### 7.4.11 Clasificación de las aguas de la Sierra Norte en cuanto al peligro de la disminución de la infiltración

Como se ha mencionado, el proceso de infiltración se refiere a la facilidad con que el agua atraviesa la superficie del suelo, y ésta se mide en términos de sodicidad.

Una tasa de infiltración es considerada baja si es de  $3.0 \text{ mm h}^{-1}$ , mientras que una tasa de infiltración de  $12.0 \text{ mm h}^{-1}$  es considerada relativamente alta.

En la Figura 68 se ilustra cómo quedan distribuidas las aguas de la Sierra Norte, de acuerdo con los efectos que tienen en los procesos de infiltración en los suelos. Aquí se toman en cuenta las variaciones que toman las concentraciones de calcio y de magnesio en los procesos de precipitación o disolución de la calcita.

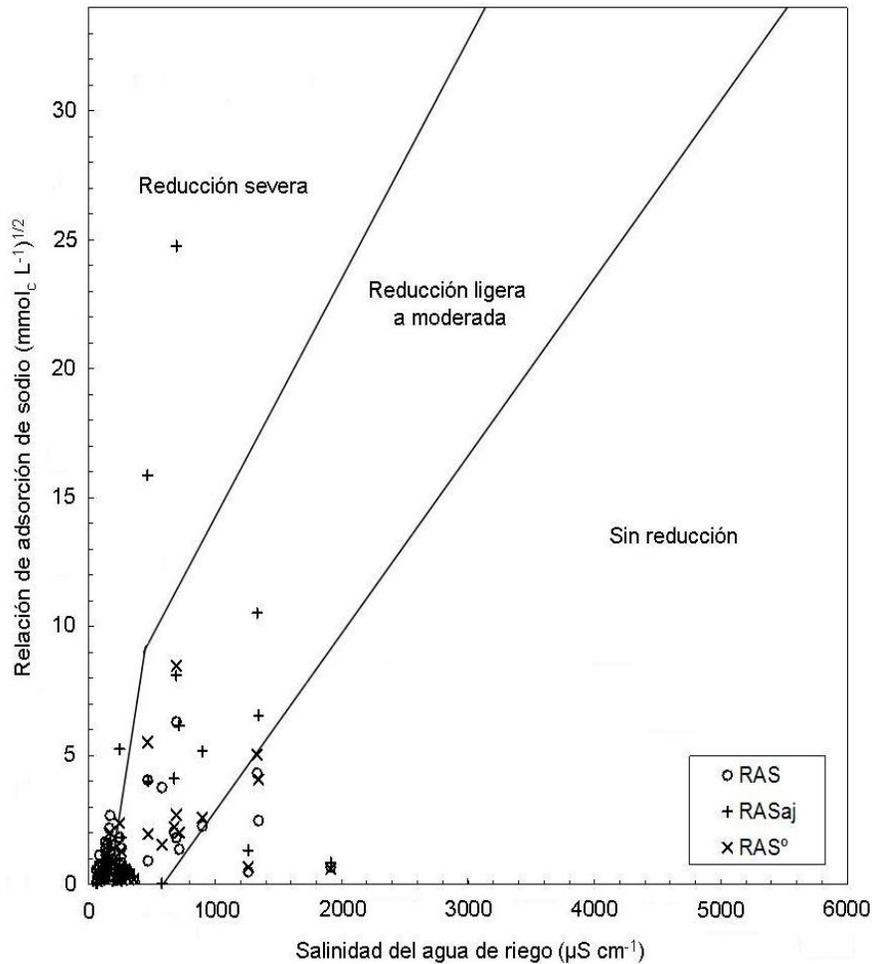


Figura 68. Clasificación de las aguas de la Sierra Norte mediante el diagrama de Ayers y Westcot. Estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.

#### 7.4.12 Carbonato de sodio residual (CSR) en las aguas de la Sierra Norte

Cuando en el agua de riego el contenido de carbonato y de bicarbonatos es mayor que el contenido de calcio y de magnesio, existe la posibilidad de que se forme carbonato de sodio, debido a que por su alta solubilidad puede permanecer en la solución después de que se han precipitado los carbonatos de calcio y de magnesio.

Altos contenidos de sodio intercambiable conducen a que en los suelos se adquieran propiedades físicas adversas para el desarrollo de los cultivos, pérdida de permeabilidad y dispersión en los suelos.

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

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

En la Figura 69 se muestra la distribución de las aguas de la Sierra Norte.

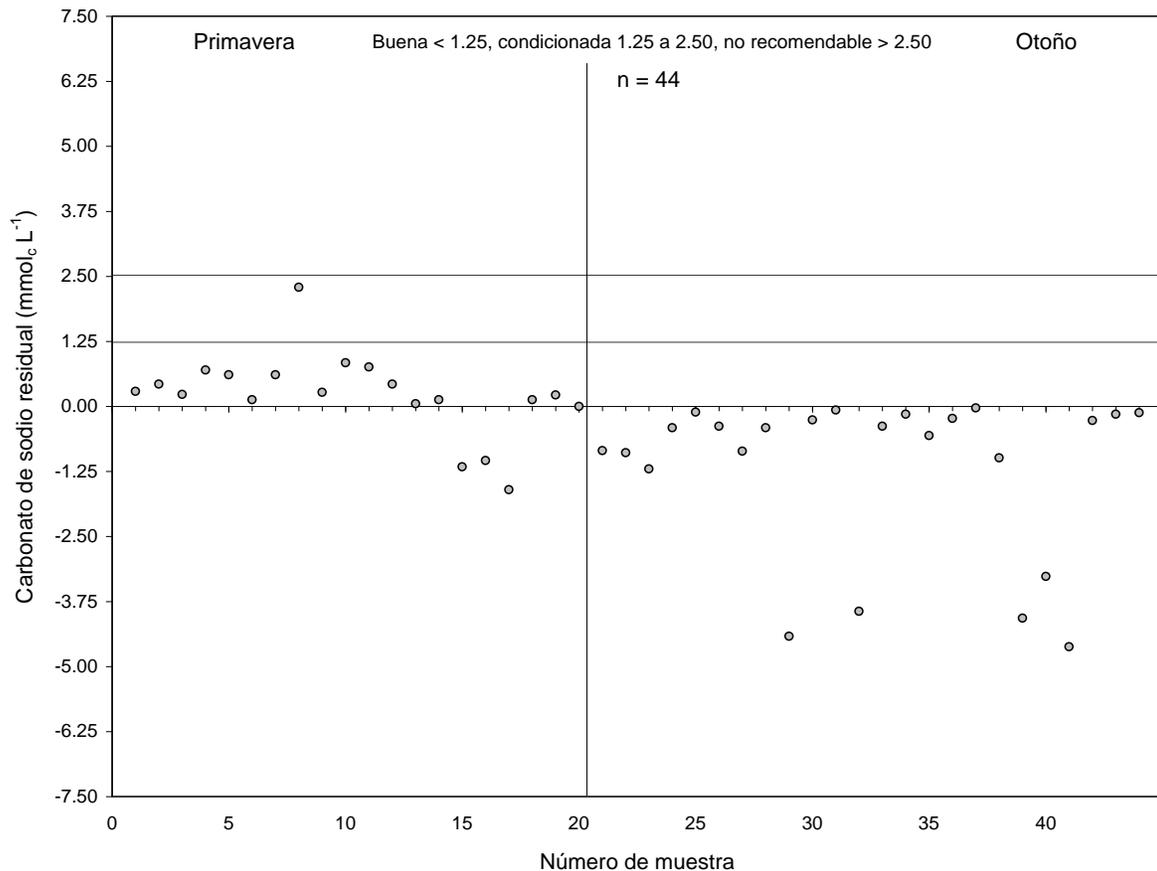


Figura 69. Evaluación del carbonato de sodio residual de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.

De acuerdo con esta figura se puede observar que las aguas de la Sierra Norte que se muestrearon en primavera 2008, tienen en sus concentraciones cantidades considerables de bicarbonatos; en cambio, las aguas que se muestrearon en otoño 2008 son cálcico-magnésicas y magnésico-cálcicas; esto se deduce por los valores negativos (-) del carbonato de sodio residual.

#### 7.4.13 La relación funcional entre el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la relación de adsorción de sodio (RAS) en las aguas de la Sierra Norte

Los constituyentes inorgánicos solubles de las aguas de riego reaccionan con los suelos en forma iónica. Los principales cationes son calcio, magnesio y sodio con muy pequeñas cantidades de potasio. Los aniones principales son carbonatos, bicarbonatos, cloruros y sulfatos. El peligro de la sodificación que tiene el uso de una agua de riego queda determinado por las concentraciones absoluta y relativa de los cationes. Si la proporción de sodio es alta, será mayor el peligro de sodificación y, al contrario, si predominan el calcio y el magnesio, el peligro es menor.

El peligro potencial de la sodicidad de una agua de riego es evaluado con los valores de la relación de adsorción de sodio (RAS). En la Figura 70 se presenta la relación funcional PSI-RAS para los diferentes valores de la relación de adsorción de sodio en sus diferentes conceptualizaciones (RAS, RAS<sub>aj</sub> y RAS<sup>0</sup>).

La relación funcional PSI-RAS se calculó para los siguientes valores del coeficiente de selectividad iónica:  $K_1 = 0.0100$ ,  $K_2 = 0.01152$  y  $K_3 = 0.01690$ . En donde los valores de K están en unidades de  $(\text{mmol L}^{-1})^{-1/2}$ .

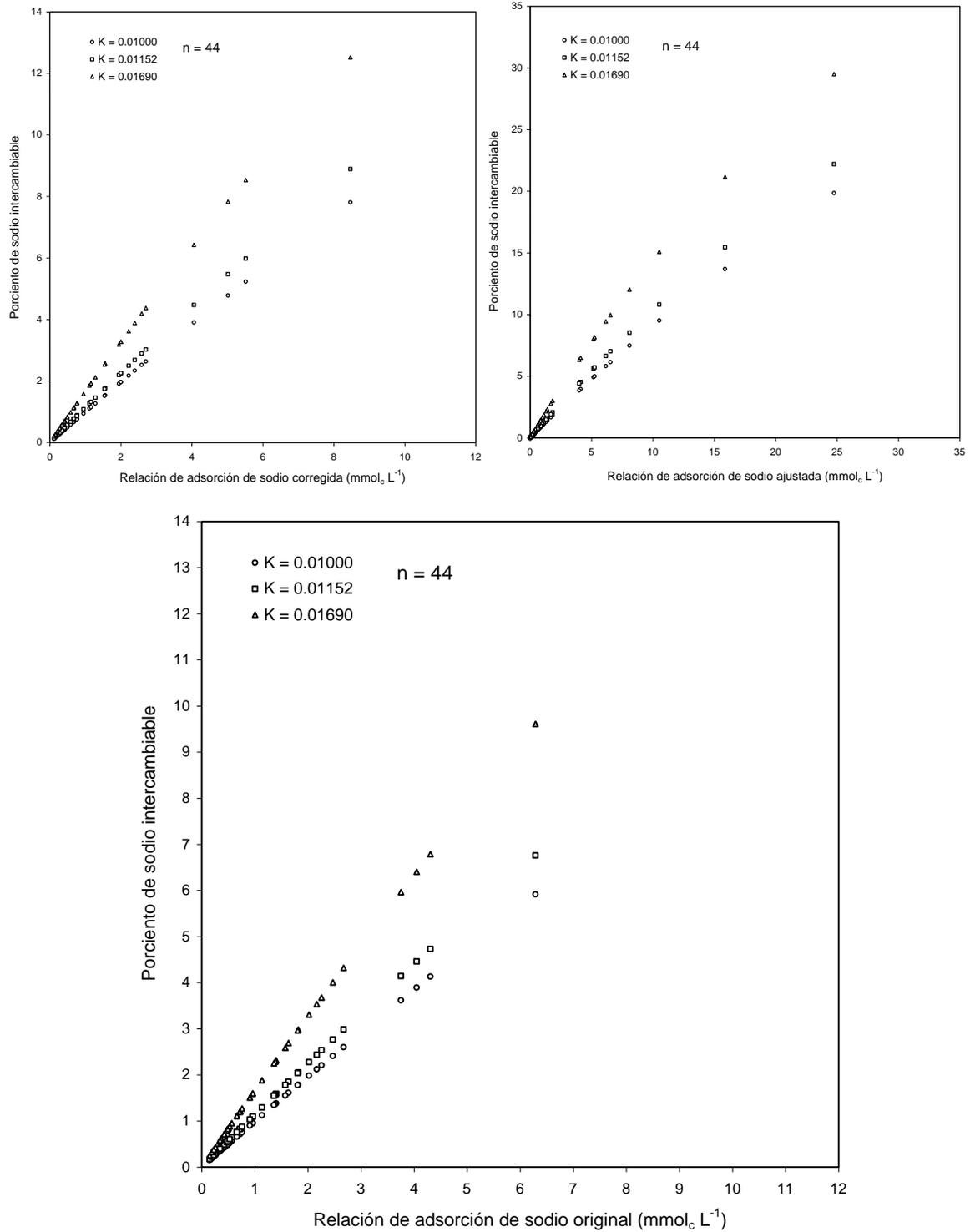


Figura 70. Relación funcional PSI-RAS con base en las distintas formulaciones de la RAS y valores de K de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.

#### 7.4.14 Distribución del boro en las aguas de la Sierra Norte

El boro es un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, pero puede hacerse tóxico cuando las concentraciones de este elemento en el agua de los suelos, se excede ligeramente de ciertas cantidades. Generalmente, concentraciones tóxicas en los suelos, se encuentran, en las regiones áridas del mundo.

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

Se han establecido diferentes intervalos de toxicidad para el boro, por ejemplo: 1. Para cultivos muy sensibles ( $< 0.5 \text{ mg L}^{-1}$ ), 2. Para cultivos sensibles ( $0.5-0.75-1.0 \text{ mg L}^{-1}$ ), 3. Para cultivos moderadamente sensibles ( $2.0-4.0 \text{ mg L}^{-1}$ ), 4. Para cultivos tolerantes ( $4.0-6.0 \text{ mg L}^{-1}$ ) y 5. Para cultivos muy tolerantes ( $6.0-15.0 \text{ mg L}^{-1}$ ) (Ayers y Westcot, 1987).

En la Figura 71 se presentan los contenidos de boro en las aguas de la Sierra Norte.

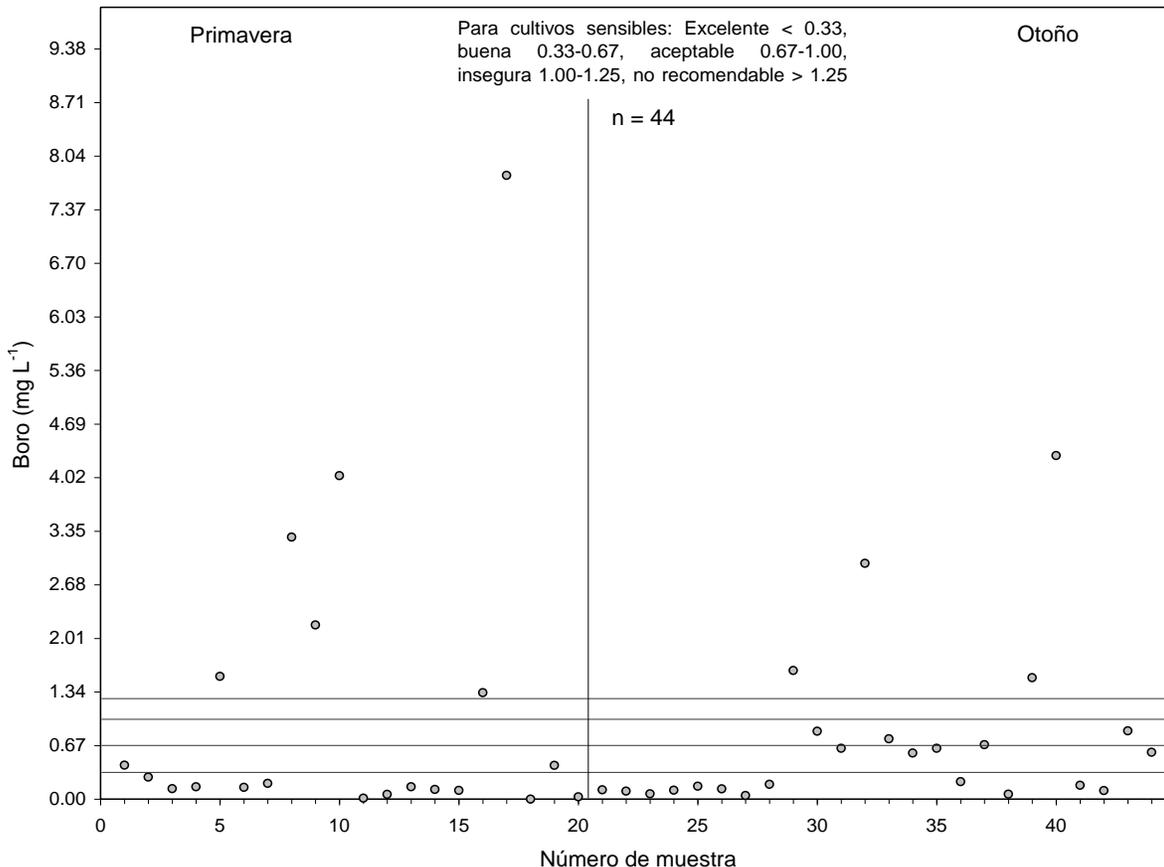


Figura 71. Evaluación del contenido de boro de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.

#### 7.4.15 Contenido de fósforo en las aguas de la Sierra Norte

El fósforo se encuentra en todas partes en la biosfera. El fósforo se presenta como fosfatos inorgánicos y como fosfatos orgánicos. Los rangos de concentración de fósforo en los suelos es de 35.0-5300.0 mg kg<sup>-1</sup> (en promedio 800.0 mg kg<sup>-1</sup>) (Bowen, 1979 citado por Ehrlich, 1990).

El contenido promedio de fósforo en aguas dulces es de 0.02 mg kg<sup>-1</sup>. El promedio de contenido del fósforo en el agua de mar es de 0.09 mg kg<sup>-1</sup>. El fósforo inorgánico puede presentarse en formas solubles e insolubles en la naturaleza. Las formas más comunes inorgánicas del fósforo son los ortofosfatos (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>).

Como especies iónicas, la concentración de fosfatos es controlada por su solubilidad en presencia de los metales alcalinotérreos como  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  y por los iones  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Al}^{3+}$  en condiciones de un pH determinado. En la Figura 72 se presentan los contenidos de fósforo en las aguas de la Sierra Norte.

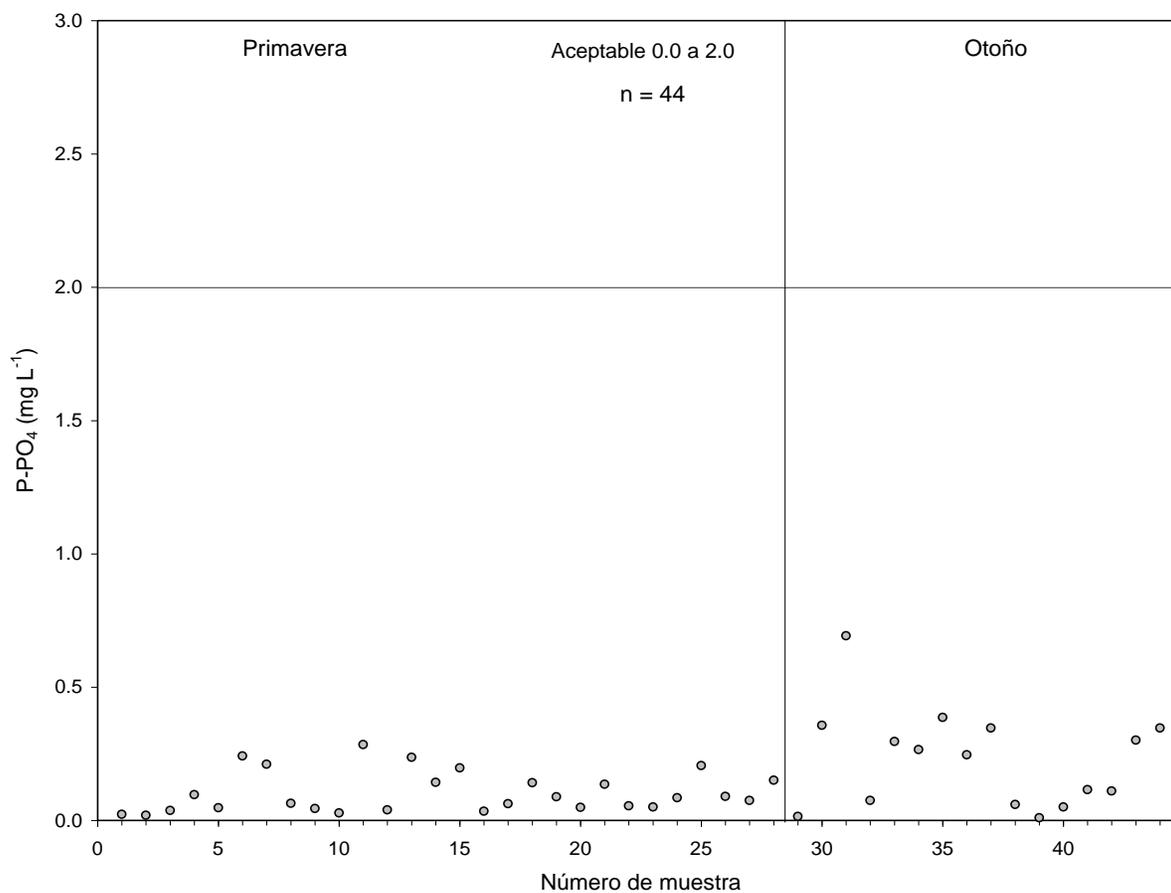


Figura 72. Evaluación del contenido de fósforo de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.

#### 7.4.16 Contenido de nitrógeno en las aguas de la Sierra Norte

La abundancia del nitrógeno en la biosfera se presenta en el Cuadro 18.

Cuadro 18. Abundancia del nitrógeno en la biosfera.

Elementos de la biosfera	Formas del nitrógeno	Cantidades del nitrógeno (kg N)
Atmósfera	N <sub>2</sub>	3.9 x 10 <sup>18</sup>
Océanos	Orgánicos (N)	9 x 10 <sup>14</sup>
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1014
Suelos	Orgánicos (N)	8 x 10 <sup>14</sup>
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1.4 x 10 <sup>14</sup>
Sedimentos	Total N	4 x 10 <sup>17</sup>
Rocas	Total N	1.9 x 10 <sup>20</sup>
Biomasa (viviente)	Total N	1.3 x 10 <sup>13</sup>

Fuente: Ehrlich(1990), citando a Fenchel y Blackfara (1979) y a Brock y Madison (1998).

En la Figura 73 se presentan los contenidos de nitrógeno (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en las aguas de la Sierra Norte, evaluadas solamente en el otoño del 2008. Ninguna muestra presenta restricción para su uso en la agricultura de acuerdo a su contenido de nitrógeno.

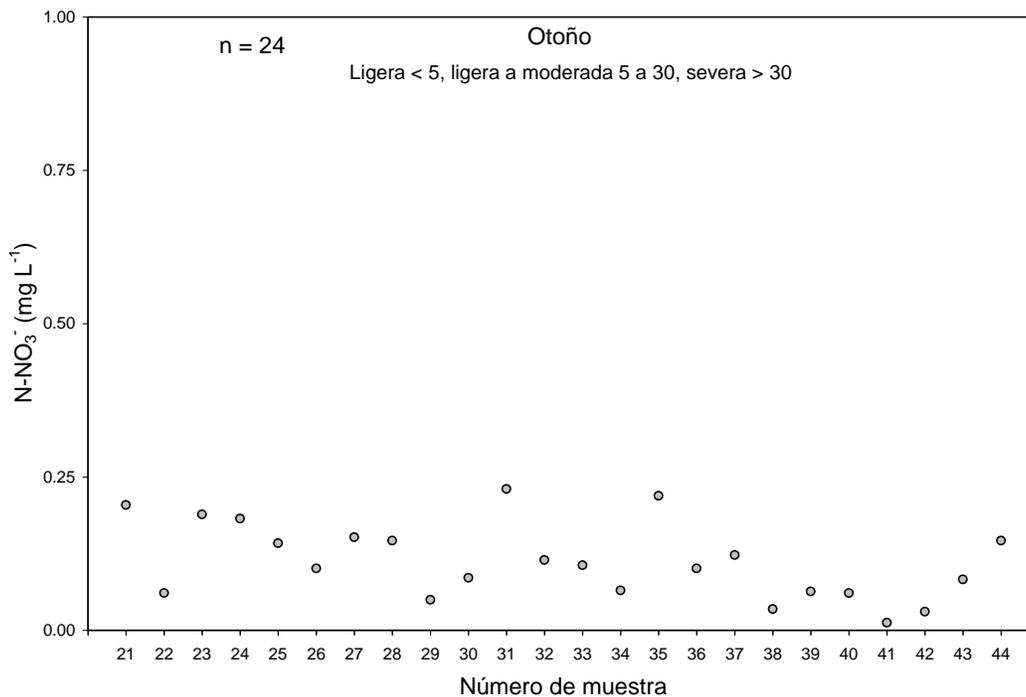


Figura 73. Evaluación del contenido de nitrógeno en las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Otoño 2008.

## 8. CONCLUSIONES

### 8.1 Cuenca del Oriental

1. Los materiales de relleno de la Cuenca del Oriental están compuestas de cenizas volcánicas de diferente composición mineralógica, esta composición influye en la característica bicarbonatada de las aguas de la cuenca.
2. Las aguas freáticas del ex-lago de Totolcingo son de alta concentración iónica. Este resultado se debe a que las aguas interactúan con los materiales de relleno y también a que se encuentran en la zona más baja, es decir, en la zona de acumulación de sales.
3. Las aguas de baja concentración, de la Cuenca del Oriental, cuando estas se encuentran en equilibrio con los suelos el PSI alcanza valores elevados, causando un deterioro en la propiedades físicas del suelo y alcanzando niveles tóxicos para los cultivos, esto debido al predominio del ion sodio sobre el calcio y el magnesio.
4. El contenido de boro es elevado en las zonas de influencia volcánica, principalmente las cercanas a la caldera Los Humeros. Este contenido alto de boro, presente en algunas fuentes de agua, alcanzan niveles tóxicos para los cultivos, ya que los principales problemas de toxicidad por boro es causada por el boro contenido en el agua de riego más que por el contenido en el suelo.

### 8.1.1 Lagos cráter

1. Las aguas de los lagos cráter de Quechulac, La Preciosa y Aljojuca, en alguna medida tienen una relación de continuidad con los acuíferos circunvecinos.
2. Las aguas de los lagos-cráter de Atexcac y de Alchichica son sódico-clorhídricas. Las aguas de estos lagos cráter, por la relación que guardan con los procesos hidrotermales, además de ser de alta concentración contienen cantidades muy altas de boro.

### 8.1.2 Suelos de las llanuras ex-lacustres de Totolcingo y de Tepeyahualco

La composición catiónica en las bases intercambiables en los suelos que se encuentran localizados en las estribaciones lacustres y adentro de las llanuras ex-lacustres se encuentran en el siguiente orden:  $\text{Na} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{K}$ .

### 8.2 Sierra Norte

1. Las aguas ácidas de la caldera de Acoculco se deben a la predominancia de los procesos de oxidación de la pirita.
2. Las aguas de la Sierra Norte son cálcico-sódico-bicarbonatadas.
3. El contenido de boro en las aguas de la Sierra Norte es bajo, aumentando en las fuentes ubicadas en la caldera de Acoculco.

## 9. RECOMENDACIONES

1. Monitorear todas las fuentes de agua de la Cuenca del Oriental: arroyos, pozos y manantiales. Este monitoreo debe hacerse al menos dos veces al año.
2. En lo que se refiere a los lagos cráter de Quechulac, La Preciosa y Aljojuca, a este respecto, es necesario establecer registros mensuales de composición cualitativa de estas aguas para compararlos con las aguas de los pozos circunvecinos.
3. Sobre las aguas ácidas de la caldera de Acoculco es necesario conducir experimentos directos de oxidación de la pirita nativa.

## 10. LITERATURA CITADA

- Adame, M. F., J. Alcocer and E. Escobar. 2008. Size-fractionated phytoplankton biomass and its implications for the dynamics of an oligotrophic tropical lake. *Freshwater Biology* 53: 22-31.
- Alcocer D., J., Ó. A. Escolero F. y L. E. Marín S. 2005. Problemática del agua de la Cuenca Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala. pp: 57-77. *In*: B. Jiménez y L. Marín (ed.). El agua en México vista desde la academia. Academia Mexicana de Ciencias. México, DF.
- Alcocer, J., A. Lugo, L. A. Oseguera y L. Peralta. 2007. Laguna de Totolcingo, Puebla y Tlaxcala. pp: 186-198. *In*: G. De la Lanza E. (ed). Las aguas interiores de México: Conceptos y casos. AGT. México, DF.
- Almeida, O. A. de. y J. M. Gisbert. 2006. Variación en la calidad del agua de riego en un huerto de cítricos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 10(1): 64-69.
- Álvarez, J. 1950. Contribución al conocimiento de los peces de la región de los Llanos, estado de Puebla (México). *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas* 6(1-4): 81-107.
- Anderson, J. U., O. F. Bailey and H. E. Dregne. 1972. Short-term effects of irrigation with high sodium waters. *Soil Sci.* 113: 358-362.
- Arredondo F., J. L. 2002. Los axalapascos de la Cuenca Oriental, Puebla. pp: 81-107. *In*: G. de la Lanza E. y J. L. García C. (compiladores). Lagos y presas de México. AGT. México, DF.
- Arredondo F., J. L., L. E. Borrego E., R. M. Castillo D. y M. Á. Valladolid L. 1983. Batimetría y morfometría de los lagos "maars" de la Cuenca de Oriental, Puebla, México. *Biótica* 8(1): 37-47.
- 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.
- Baccaro, K., M. Degorgue, M. Lucca, L. Picote, E. Zamuner y Y. Andreoli. 2006. calidad del agua para consumo humano y riego en muestras del Cinturón Hortícola de Mar del Plata. *RIA* 35(3): 95-110.

- Bates, L. M. and A. E. Hall. 1981. Stomatal closure with soil water depletion not associated with changes in bulk leaf water status. *Oecologia* 50: 62-65.
- Benson, S. W. 2007. Cálculos químicos. Una introducción al uso de las matemáticas en la química. Limusa. México. p. 125-133.
- Bingham, F. T. 1982. Boron. pp: 435-436. *In*: A. L. Page (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy 9* (2nd Edition). ASA, SSSA. Wisconsin, USA.
- Bower, C. A. and Maasland. 1963. Sodium hazard of Punjab ground waters. *West Pakistan Eng. Congr. Proc.* 50: 49-61.
- Bower, C. A., G. Ogata and J. M. Tucker. 1968. Sodium hazard of irrigation waters as influenced by leaching fraction and by precipitation or solution of calcium carbonate. *Soil Sci.* 106 (1): 29-34.
- Calzadilla P., A. 2002 y 2003. Monitoreo de una formación deltáica reciente en un humedal costero tropical utilizando imágenes aeroespaciales y SIG. Caso delta del río Guapo, Laguna de Tacarigua, Venezuela. *Terra Nueva Etapa 8 y 9* (27-28): 53-83.
- Camprubí, A., E. González P., G. Levresse, J. Tritlla y A. Carrillo C. 2003. Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 56(1): 10-18.
- Capra, L., J. Lugo H. y J. J. Zamorano O. 2006. La importancia de la geología en el estudio de los procesos de remoción en masa: el caso de Totomoxtla, Sierra Norte de Puebla, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 58(2): 205-214.
- Carrasco N., G. and M. J. Branney. 2005. Progressive assembly of a massive layer of ignimbrite with a normal-to-reverse compositional zoning: the Zaragoza ignimbrite of central Mexico. *Bull Volcanol* 68: 3-20.
- Carrasco N., G., N. H. Hort and C. Romero. 2007. Evolution and hydrological conditions of a maar volcano (Atexcac crater, Eastern Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 159: 179-197.

- Casierra P., F. y S. Y. Rodríguez. 2006. Tolerancia de plantas de feijoa (*Acca sellowiana* [Berg] Burret) a la salinidad por NaCl. *Agronomía Colombiana* 24(2): 258-265.
- Castillo, L. F. del. 2003. El fenómeno mágico de la ósmosis. Tercera edición. La ciencia para todos No. 16. Fondo de Cultura Económica. México, DF. pp: 32-38.
- Chang, R. 2007. Química. Novena edición. McGraw Hill Interamericana. México, DF. pp: 169-219.
- 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.
- Eguiluz de A., S., M. Aranda G. y R. Marrett. 2000. Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 53:1-26.
- Ehrlich, H. L. 1990. Geomicrobiology. Second edition. Marcel Dekker. New York, USA. pp: 219-237.
- 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.* 23: 263-266.
- Frenkel, H. 1984. Reassessment of water quality criteria for irrigation. pp: 143-171. *In*: I. Shainberg and J. Shalhevet (ed.). *Soil Salinity under irrigation processes and Management*. Springer-Verlag. Berlin, Germany.
- Fuentes A., L. 1972. Regiones naturales del estado de Puebla. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. México, DF. 143 p.
- Gasca D., A. 1981. Algunas notas de la génesis de los lagos-cráter de la Cuenca de Oriental, Puebla-Tlaxcala-Veracruz. Colección Científica, Prehistoria No. 98. INAH. México, DF. 58 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.
- Goykovic, C. V. y G. Saavedra del R. 2007. Algunos efectos de la salinidad en el cultivo del tomate y prácticas agronómicas de su manejo. *IDESIA* 25(3): 47-58.
- Greenberg, A. E., L. N. Clesceri and A. D. Eaton. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th Edition. APHA, AWWA, WEF. Washington, USA. 1100 p.
- Haro, J. C. 1911. Ligeros apuntes sobre accidentes geológicos en los Estados de Puebla y Morelos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 7: 145-148.
- INEGI, 2010. Regiones y cuencas hidrológicas [En línea]. Disponible en: <http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/pue/rh.cfm?c=444&e=16> (revisado el 10 de enero de 2010).
- Ivanov, V. V. 1967. Principal geochemical environments and processes of the formation of hydrothermal waters in regions of recent volcanic activity. pp: 260-281. *In: A. P. Vinogradov (ed.). Chemistry of the earth's crust. Volume 2. Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem, Israel.*
- Jurinak, J. J. and D. L. Suarez. 1990. The chemistry of salt affected-soils and water. pp: 42-63. *In: K. K. Tanji (ed.). Agricultural salinity assessment and management. ASCE. New York, USA.*
- Kovda, V. A. 1961. Principles of the theory and practice of reclamation and utilization of saline soils in the arid zones. *In: UNESCO (ed.) Salinity problems in the arid zones: proceedings of the Teheran symposium. UNESCO. Paris, Francia. p. 201-213.*
- 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.

- Läuchli, A. and E. Epstein. 1990. Plant response to saline and sodic conditions. pp: 133-137. *In*: K. K. Tanji (ed.). Agricultural salinity assessment and management. ASCE. New York, USA.
- Lermo, J., Y. Antayayhua, I. Bernal, S. Venegas y J. Arredondo. 2009. Monitoreo sísmico en la zona geotérmica de Acapulco, Puebla, México. *Geotermia* 22(1): 40-58.
- Lesser I., J. M. 1987. Hidrogeoquímica. *In*: UACH (ed.). Geohidrología. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Irrigación. Chapingo, México. pp. 127-170.
- Lesser I., J. M., F. Sánchez D. y D. Gonzáles P. 1986. Hidrogeoquímica del acuífero de la ciudad de México. *Ingeniería Hidráulica en México* 1(4): 64-77.
- López H., A., G. García E., G. Aguirre D., E. González P., H. Palma G. y J. L. Quijano L. 2009. Hydrothermal activity in the Tulancingo-Acapulco Caldera Complex, central Mexico: Exploratory studies. *Geothermics* 38(3): 279-293.
- Maas, E. V. 1990. Crop salt tolerance. pp: 262-304. *In*: K. K. Tanji (ed.). Agricultural salinity assessment and management. ASCE. New York, USA.
- Macek, M., G. Vilaclara F., A. Lugo V. y J. Alcocer D. 2007. Lago de Atexcac. pp: 200-212. *In*: G. de la Lanza E. (compilador). Las aguas interiores de México: Conceptos y Casos. AGT. México, D. F.
- Martin, V., K. Németh, V. Lorenz and J. D. L. White. 2007. Introduction: Maar-diatreme volcanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 159: 1-3.
- McNeal, B. L. and N. T. Coleman. 1966. Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30: 308-312.
- McNeal, B. L., D. A. Layfield, W. A. Norvell and J. D. Rhoades. 1968. Factors influencing hydraulic conductivity of soils in presence of mixed-salt solutions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32: 187-190.
- Méndez R., I., D. Namihira G., L. Moreno A. y C. Sosa de M. 1990. El protocolo de investigación. Lineamientos para su elaboración y análisis. Segunda edición. Trillas. México, DF. 210 p.

- Mendoza S., I. 2009. Calidad de las aguas residuales urbano-industriales que riegan el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Tesis Doctora en Ciencias. Hidrociencias, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 195 p.
- Miyamoto, S. and N. E. Pingitore. 1992. Predicting calcium and magnesium precipitation in saline solutions following evaporation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1767-1775.
- Morales, D., M. del C. Bolarín y E. Cayuela. 2006. Respuesta de plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) a la aplicación de diferentes niveles de NaCl. I. Crecimiento y relaciones hídricas. *Cultivos Tropicales* 27(4): 27-32.
- Morales, D., M. del C. Bolarín y E. Cayuela. 2008. Respuesta de plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) a la aplicación de diferentes niveles de NaCl. II. Iones inorgánicos y orgánicos. *Cultivos Tropicales* 29(3): 59-62.
- Nordstrom, D. K. 1982. Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals. pp: 37-56. *In*: J. A. Kittrick, D. S. Fanning and L. R. Hossner (eds.). 1982. Acid sulfate weathering. SSSA special publication number 10. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA.
- Nilsen, E. T. and D. M. Orcutt. 1996. The physiology of plants under stress. Abiotic factors. John Wiley. New York, USA. pp: 322-361.
- NOM-O14-SSA1-1993. Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados. México, DF. 8 p.
- NOM-O21-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. México, DF. 85 p.
- Oster, J. D. 1994. Irrigation with poor quality water. *Agric. Water Manag.* 25: 271-297.
- Oster, J. D. and F. W. Schroer. 1979. Infiltration as influenced by irrigation water quality. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 444-447.
- Parés, J., M. Arizaleta, M. E. Sanabria y G. García. 2008. Efecto de los niveles de salinidad sobre la densidad estomática, índice estomático y el grosor foliar en plantas de *Carica papaya* L. *Acta Bot. Venez.* 31(1): 27-34.
- Pérez C., J. P. 1992. Caracterización y diagnóstico de los sistemas de producción agropecuarios en cinco unidades edafoclimáticas de la Sierra Norte de Puebla.

- Tesis Maestría en Ciencias. Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 294 p.
- Pfeffer, P. and K. Kozhevnikov, 1967. Methods for determine the exchange capacity of calcareous soils. *Soviet Soil Science* 6: 818-823.
- Piper, A. M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analysis. *Am. Geophys. Union Trans.* 25: 914-923.
- Pizarro, F. 1985. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Segunda edición. *Agrícola Española*. Madrid, España. pp: 74-124.
- Pupisky, H. and I. Shainberg. 1979. Salt effects on the hydraulic conductivity on the sandy soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 429-433.
- Quinto, A., E. Santoyo, V. Torres, E. González y D. Castillo. 1995. Estudio geoquímico-ambiental de los efluentes naturales producidos en la zona geotérmica de Aocolco, Puebla. *Ingeniería Hidráulica en México* 10(3): 21-27.
- Ramírez G., P. y A. Novelo R. 1984. La vegetación acuática vascular de seis lagos-cráter del estado de Puebla, México. *Bol. Soc. Bot. México.* 46: 75-88.
- Ramírez G., P. y F. Vázquez G. 1989. Contribuciones al estudio limnobotánico de la zona litoral de seis lagos cráter del estado de Puebla. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología* 16(1): 1-16.
- Ramírez M., O. M. 1988. Determinación experimental de la capacidad germinativa de algunos cultivos agrícolas en soluciones salinas de diferente concentración total y composición cualitativa. Tesis Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 217 p.
- Reyes C., M. 1979. Geología de la Cuenca de Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala. Colección Científica Prehistoria. SEP-INAH. México, DF. 62 p.
- Richards, L. A. 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.
- Riggs, N. and G. Carrasco N. 2004. Evolution of a complex isolated dome system, Cerro Pizarro, central México. *Bull Volcano* 66: 322-335.

- 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. 1990. *Análisis de las aguas. Segunda reimpresión.* Omega. Barcelona, España. pp: 186-191.
- Salas, J. A., M. E. Sanabria y R. Pire. 2001. Variación en el índice y densidad estomática en plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) sometidos a tratamientos salinos. *Bioagro* 13(3): 99-104.
- Sánchez B., E., M. Ortega E., V. Gonzáles H., G. Ruelas A., J. Kohashi S. y N. García C. 2002. Tolerancia de tubérculos de papa cv. Alpha en etapa de brotación a condiciones de salinidad. *Terra* 21: 481-491.
- 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.
- Shainberg, I. and J. D. Oster. 1978. Quality of irrigation water. Publication No. 2. International Irrigation Information Center. Bet Dagan, Israel. 65 p.
- Shishkina, L. A. 1974. Hidrogeoquímica (En Ruso). Hidrometeorología. Leningrado, Rusia. p. 47.
- Silva R., H., M. Ortiz L. y E. Acevedo H. 2007. Relaciones hídricas y ajuste osmótico en trigo. *Agrociencia* 41(1): 23-34.
- Strogonov, B. P. 1964. Physiological basis of salt tolerance of plants (as affected by various types of salinity). Israel Program for Scientific Translation. Jerusalem, Israel. 279 p.
- Suarez, D. L. 1981. Relation between pH and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternative method of estimating SAR of soil or drainage waters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 464-475.
- Szabolcs, I. 1989. Salt affected soils. CRS Press. Boca Raton, Florida, USA. 274 p.
- Tanji, K. K. 1990. Nature and extent of agricultural salinity. pp: 1-17. *In:* K. K. Tanji (ed.). *Agricultural salinity assessment and management.* ASCE. New York, USA.
- Thorne, D. W. and Peterson, H. B. 1949. Irrigated soils. Their fertility and management. The Blakiston Company. Philadelphia and Toronto, USA. p. 208.

- Valencia del T., G. y M. E. Garín A. 2007. Modelos fisicoquímicos. Solución de problemas. UNAM, FES-Iztacala. México. pp: 100-102.
- VAPRO. 1995. User's manual. Wescor. USA. 99 p.
- Velázquez M., M. A. 2001. Las variaciones de los procesos de adsorción de sodio en función de los diferentes valores de la relación de adsorción de sodio en las aguas residuales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan, Valle del Mezquital, Hgo. Tesis Doctora en Ciencias. Hidrociencias, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México. 116 p.
- 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.
- Watanabe, T. 1967. Geochemical cycle and concentration of boron in the earth's crust. pp: 167-178. *In*: A. P. Vinogradov (ed.). Chemistry of the earth's crust. Volumen 2. Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem, Israel.
- Wilcox, L. V., G. Y. Blair and C. A. Bower. 1954. Effect of bicarbonate on suitability of water for irrigation. Soil Science 77(4): 259-266.
- Yáñez G., C. y S. García D. 1982. Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz. Comisión Federal de Electricidad. México, DF. 96 p.
- Zapozec, A. 1972. Graphical interpretation of water-quality data. Ground Water 10(2): 32-43.

## 11. ANEXOS

### Anexo A. Cuenca del Oriental

Cuadro A1. Identificación de los puntos de toma de muestras de agua en la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

Estación	Nombre	Posición		Elevación m
		N	S	
1	Lago cráter Aljojuca	19° 05.596'	097° 32.294'	2356
2	Lago cráter Tecuitlapa	19° 07.365'	097° 32.615'	2359
3	Pozo (Pivote central) Rancho El Volcán	19° 12.083'	097° 35.272'	2362
4	Río Texalapa	19° 11.476'	097° 24.962'	2451
5	Pozo La Noria Ex Hacienda San José Ozumba	19° 12.898'	097° 44.042'	2369
6	Pozo El Viento Ex Hacienda San José Ozumba	19° 12.898'	097° 44.042'	2369
7	Pozo (Pivote central) Ex Hacienda San José Ozumba	19° 13.333'	097° 44.382'	2369
8	Pozo (Aspersores) Hda. Ojo de Agua	19° 16.023'	097° 43.068'	2356
9	Pozo (Cañón estático) Hda. Ojo de Agua	19° 16.103'	097° 42.856'	2360
10	Pozo (Cañón viajero) Rancho Ojo de Agua	19° 16.280'	097° 42.650'	2359
11	Estación Manantiales	19° 16.300'	097° 42.420'	2360
12	Manatíal de Vicencio (Hda. Vicencio)	19° 17.513'	097° 40.131'	2354
13	Poza Permanente (Hda. Vicencio)	19° 16.658'	097° 39.807'	2351
14	Nacimiento Las Huertas	19° 16.240'	097° 39.705'	2351
15	Agua Freática Las Huertas	19° 16.240'	097° 39.705'	2351
16	Nacimiento El Carmen	19° 19.029'	097° 37.942'	2352
17	Laguna Totolcingo (El Carmen)	19° 18.100'	097° 36.250'	2339
18	Pozo (Melgas y surcos) en Laguna Totolcingo	19° 17.028'	097° 33.967'	2356
19	Pozo (Surcos) Rancho Los Julianes	19° 15.095'	097° 32.573'	2373
20	Pozo 1 (Pivote central) Rancho Los Julianes	19° 14.690'	097° 31.925'	2381
21	Pozo 2 (Pivote central) Rancho Los Julianes	19° 14.405'	097° 31.464'	2393
22	Pozo (Aspersores) Francisco I. Madero	19° 14.960'	097° 14.240'	2818
23	Lago cráter Atexcac	19° 20.194'	097° 26.857'	2355
24	Pozo (Aspersores) Quechulac	19° 22.330'	097° 19.933'	2374
25	Pozo (Cañón estático) Rancho Quechulac	19° 22.603'	097° 20.596'	2381
26	Pozo (Aspersores) Rancho San Isidro Labrador	19° 22.914'	097° 20.930'	2362
27	Lago cráter Quechulac	19° 22.667'	097° 21.359'	2337
28	Pozo (Aspersores) Rancho La Laguna	19° 22.734'	097° 22.911'	2359
29	Lago cráter La Preciosa	19° 22.480'	097° 23.012'	2338
30	Pozo (Aspersores) Rancho La Amistad	19° 22.887'	097° 23.515'	2347
31	Pozo (Pivote central) Rancho La Laguna	19° 22.903'	097° 22.853'	2350
32	Pozo (Aspersores) Chichicuátla	19° 23.179'	097° 22.836'	2334
33	Pozo 2 (Aspersores) Chichicuátla	19° 23.118'	097° 22.504'	2342
34	Pozo 4 (Aspersores) Chichicuátla	19° 23.310'	097° 22.497'	2344
35	Lago cráter Alchichica	19° 24.547'	097° 23.822'	2332
36	Laguna Tepeyahualco (El Salado)	19° 28.511'	097° 26.104'	2331
37	Pozo (Pivote central) Ex Hacienda Rancho Virreyes	19° 23.936'	097° 37.172'	2343
38	Pozo (Pivote central) Rancho San Juan	19° 23.923'	097° 37.550'	2353
39	Pozo (Pivote central) Rancho San Juan	19° 25.740'	097° 39.364'	2354
40	Pozo (Aspersores) Cosmaco	19° 30.667'	097° 38.887'	2375
41	Pozo 2 (Aspersores) Ejido Buenavista	19° 30.764'	097° 38.619'	2373
42	Pozo (Aspersores) Rancho Concepción de Allende	19° 32.446'	097° 35.630'	2378
43	Pozo (Cañones rodantes-Side roll) Rancho San Alantín	19° 33.677'	097° 37.330'	2407
44	Pozo (Pivote central) Perote-Los Humeros CGM	19° 34.566'	097° 19.557'	2380
45	Pozo (Pileta 1) Los Humeros	19° 41.227'	097° 27.316'	2831
46	Pozo (Pileta 2) Los Humeros	19° 41.227'	097° 27.316'	2831

Cuadro A2. Concentración iónica de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera 2008.

No.	Estación	pH	CE μS cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup> mmol L <sup>-1</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma cationes	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mmol L <sup>-1</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma aniones	Suma mg L <sup>-1</sup> /mmol L <sup>-1</sup>	Error %	STD mg L <sup>-1</sup>
1	5	8.2	1007	1.52	5.31	2.34	0.78	9.95	0.00	6.68	2.54	0.47	9.69	699.39	1.32	716.88
				30.46	64.52	53.82	30.50		0.00	407.48	90.04	22.57		15.99		
				0.76	2.66	2.34	0.78		0.00	6.68	2.54	0.24				
2	6	8.2	714	1.12	3.45	2.00	0.48	7.05	0.00	4.09	2.36	0.40	6.85	481.49	1.44	496.42
				22.44	41.92	46.00	18.77		0.00	249.49	83.66	19.21		11.42		
				0.56	1.73	2.00	0.48		0.00	4.09	2.36	0.20				
3	10	8.6	285	0.42	1.10	1.18	0.11	2.81	0.10	1.80	0.75	0.08	2.73	196.45	1.44	203.52
				8.42	13.37	27.14	4.30		3.00	109.80	26.59	3.84		4.69		
				0.21	0.55	1.18	0.11		0.05	1.80	0.75	0.04				
4	11	8.8	277	0.30	1.25	1.09	0.10	2.74	0.25	1.58	0.72	0.12	2.67	185.35	1.29	191.83
				6.01	15.19	25.07	3.91		7.50	96.38	25.52	5.76		4.45		
				0.15	0.63	1.09	0.10		0.13	1.58	0.72	0.06				
5	16	9.1	566	0.58	0.68	4.10	0.23	5.59	0.10	3.30	1.72	0.30	5.42	402.86	1.54	415.35
				11.62	8.26	94.30	8.99		3.00	201.30	60.97	14.41		10.18		
				0.29	0.34	4.10	0.23		0.05	3.30	1.72	0.15				
6	18	8.8	1420	1.40	1.78	10.60	0.24	14.02	0.60	6.10	3.35	3.58	13.63	983.67	1.41	1009.25
				28.06	21.63	243.80	9.38		18.00	372.10	118.76	171.95		23.97		
				0.70	0.89	10.60	0.24		0.30	6.10	3.35	1.79				
7	19	7.8	1814	3.20	3.60	10.28	0.84	17.92	0.00	8.84	6.28	2.34	17.46	1251.41	1.30	1282.69
				64.13	43.74	236.44	32.84		0.00	539.24	222.63	112.39		30.81		
				1.60	1.80	10.28	0.84		0.00	8.84	6.28	1.17				
8	20	8.1	661	1.12	1.92	3.17	0.32	6.53	0.00	3.85	1.35	1.12	6.32	467.70	1.63	482.19
				22.44	23.33	72.91	12.51		0.00	234.85	47.86	53.79		10.77		
				0.56	0.96	3.17	0.32		0.00	3.85	1.35	0.56				
9	21	8.2	956	2.25	2.96	4.13	0.10	9.44	0.00	6.02	2.84	0.30	9.16	662.26	1.51	682.13
				45.09	35.96	94.99	3.91		0.00	367.22	100.68	14.41		15.85		
				1.13	1.48	4.13	0.10		0.00	6.02	2.84	0.15				
10	22	8.6	100	0.18	0.42	0.34	0.04	0.98	0.06	0.52	0.28	0.10	0.96	66.34	1.03	69.00
				3.61	5.10	7.82	1.56		1.80	31.72	9.93	4.80		1.56		
				0.09	0.21	0.34	0.04		0.03	0.52	0.28	0.05				
11	24	9.0	190	0.20	0.28	1.19	0.20	1.87	0.04	1.25	0.35	0.18	1.82	141.10	1.36	146.61
				4.01	3.40	27.37	7.82		1.20	76.25	12.41	8.65		3.34		
				0.10	0.14	1.19	0.20		0.02	1.25	0.35	0.09				
12	25	9.0	248	0.22	0.32	1.69	0.22	2.45	0.06	1.66	0.45	0.20	2.37	184.39	1.66	190.84
				4.41	3.89	38.87	8.60		1.80	101.26	15.95	9.61		4.42		
				0.11	0.16	1.69	0.22		0.03	1.66	0.45	0.10				
13	26	9.1	312	0.28	0.41	2.27	0.12	3.08	0.07	1.84	0.85	0.21	2.97	222.05	1.82	229.83
				5.61	4.98	52.21	4.69		2.10	112.24	30.13	10.09		5.57		
				0.14	0.21	2.27	0.12		0.04	1.84	0.85	0.11				
14	30	8.4	1623	2.48	4.04	9.23	0.28	16.03	0.90	9.51	3.15	2.05	15.61	1139.26	1.33	1167.74
				49.70	49.09	212.29	10.95		27.00	580.11	111.67	98.46		26.91		
				1.24	2.02	9.23	0.28		0.45	9.51	3.15	1.03				
15	31	8.4	1452	2.10	3.45	8.61	0.18	14.34	0.62	7.91	3.10	2.24	13.87	1007.66	1.67	1032.85
				42.08	41.92	198.03	7.04		18.60	482.51	109.90	107.59		24.01		
				1.05	1.73	8.61	0.18		0.31	7.91	3.10	1.12				
16	32	8.9	848	0.80	1.40	5.99	0.18	8.37	0.12	5.46	2.04	0.48	8.10	609.88	1.64	628.18
				16.03	17.01	137.77	7.04		3.60	333.06	72.32	23.05		15.07		
				0.40	0.70	5.99	0.18		0.06	5.46	2.04	0.24				
17	33	9.1	800	0.76	1.48	5.50	0.16	7.90	0.24	4.80	2.00	0.58	7.62	564.73	1.80	581.67
				15.23	17.98	126.50	6.26		7.20	292.80	70.90	27.86		13.99		
				0.38	0.74	5.50	0.16		0.12	4.80	2.00	0.29				
18	34	8.4	775	0.80	1.30	5.41	0.14	7.65	0.14	4.72	2.05	0.46	7.37	548.62	1.86	565.08
				16.03	15.80	124.43	5.47		4.20	287.92	72.67	22.09		13.67		
				0.40	0.65	5.41	0.14		0.07	4.72	2.05	0.23				
19	37	8.7	532	0.25	3.05	1.85	0.10	5.25	0.15	3.30	1.24	0.42	5.11	358.46	1.35	369.21
				5.01	37.06	42.55	3.91		4.50	201.30	43.96	20.17		8.43		
				0.13	1.53	1.85	0.10		0.08	3.30	1.24	0.21				
20	38	8.9	369	0.48	0.58	2.44	0.14	3.64	0.06	2.49	0.68	0.32	3.55	271.43	1.25	280.93
				9.62	7.05	56.12	5.47		1.80	151.89	24.11	15.37		6.47		
				0.24	0.29	2.44	0.14		0.03	2.49	0.68	0.16				
21	39	9.0	234	0.44	0.58	1.17	0.12	2.31	0.08	1.55	0.35	0.26	2.24	169.31	1.54	175.24
				8.82	7.05	26.91	4.69		2.40	94.55	12.41	12.49		3.87		
				0.22	0.29	1.17	0.12		0.04	1.55	0.35	0.13				
22	40	8.7	221	0.42	0.52	1.14	0.10	2.18	0.08	1.46	0.42	0.16	2.12	158.90	1.40	164.46
				8.42	6.32	26.22	3.91		2.40	89.06	14.89	7.68		3.71		
				0.21	0.26	1.14	0.10		0.04	1.46	0.42	0.08				
23	41	8.6	214	0.38	0.42	1.23	0.08	2.11	0.06	1.12	0.50	0.38	2.06	150.23	1.20	155.49
				7.62	5.10	28.29	3.13		1.80	68.32	17.73	18.25		3.55		
				0.19	0.21	1.23	0.08		0.03	1.12	0.50	0.19				
24	42	9.0	249	0.48	0.58	1.30	0.10	2.46	0.10	1.56	0.50	0.24	2.40	177.89	1.23	184.11
				9.62	7.05	29.90	3.91		3.00	95.16	17.73	11.53		4.16		
				0.24	0.29	1.30	0.10		0.05	1.56	0.50	0.12				
25	43	9.1	235	0.46	0.56	1.18	0.12	2.32	0.09	1.50	0.55	0.22	2.36	172.12	0.85	178.14
				9.22	6.80	27.14	4.69		2.70	91.50	19.50	10.57		4.02		
				0.23	0.28	1.18	0.12		0.05	1.50	0.55	0.11				
26	44	8.5	1833	1.25	6.75	9.41	0.69	18.10	1.50	9.17	6.50	0.46	17.63	1207.36	1.32	1237.54
				25.05	82.01	216.43	26.98		45.00	559.37	230.43	22.09		30.75		
				0.63	3.38	9.41	0.69		0.75	9.17	6.50	0.23				
27	45	7.6	550	0.30	0.48	4.35	0.30	5.43	0.00	3.42	1.17	0.70	5.29	407.34	1.31	419.56
				6.01	5.83	100.05	11.73		0.00	208.62	41.48	33.62		9.98		
				0.15	0.24	4.35	0.30		0.00	3.42	1.17	0.35				
28	46	7.8	942	0.36	0.65	7.48	0.81	9.30	0.00	5.17	2.80	1.07	9.04	684.85	1.42	705.39
				7.21	7.90	172.04	31.67		0.00	315.37	99.26	51.39		17.30		
				0.18	0.33	7.48	0.81		0.00	5.17	2.80	0.54				

Cuadro A3. Concentración iónica de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Otoño 2008.

No.	Estación	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup> mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma cationes	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma aniones	Suma mg L <sup>-1</sup> /mmol L <sup>-1</sup>	Error %	STD mg L <sup>-1</sup>
29	3	7.9	731	2.20	2.65	2.25	0.12	7.22	0.00	3.72	2.35	0.94	7.01		1.48	
				44.09	32.20	51.75	4.69				0.00	226.92	83.31	45.15	488.10	502.75
				1.10	1.33	2.25	0.12				0.00	3.72	2.35	0.47	11.34	
30	4	8.1	79	0.32	0.18	0.22	0.06	0.78	0.00	0.29	0.18	0.29	0.76		1.30	
				6.41	2.19	5.06	2.35				0.00	17.69	6.38	13.93	54.01	56.17
				0.16	0.09	0.22	0.06				0.00	0.29	0.18	0.15	1.15	
31	5	7.2	1398	4.50	6.15	2.44	0.72	13.81	0.00	8.75	3.55	1.14	13.44		1.36	
				90.18	74.72	56.12	28.15				0.00	533.75	125.85	54.75	963.53	987.61
				2.25	3.08	2.44	0.72				0.00	8.75	3.55	0.57	21.36	
32	7	7.2	677	3.18	2.30	1.02	0.19	6.69	0.00	4.27	1.95	0.27	6.49		1.52	
				63.73	27.95	23.46	7.43				0.00	260.47	69.13	12.97	465.13	479.08
				1.59	1.15	1.02	0.19				0.00	4.27	1.95	0.14	10.31	
33	8	7.3	362	1.45	1.05	0.85	0.23	3.58	0.00	2.11	1.12	0.26	3.49		1.27	
				29.06	12.76	19.55	8.99				0.00	128.71	39.70	12.49	251.26	260.05
				0.73	0.53	0.85	0.23				0.00	2.11	1.12	0.13	5.69	
34	9	7.7	363	1.31	1.20	0.84	0.22	3.57	0.00	2.26	0.95	0.27	3.48		1.28	
				26.25	14.58	19.32	8.60				0.00	137.86	33.68	12.97	253.26	262.12
				0.66	0.60	0.84	0.22				0.00	2.26	0.95	0.14	5.66	
35	11	7.3	392	1.60	1.10	0.96	0.21	3.87	0.00	2.32	1.20	0.24	3.76		1.44	
				32.06	13.37	22.08	8.21				0.00	141.52	42.54	11.53	271.31	280.80
				0.80	0.55	0.96	0.21				0.00	2.32	1.20	0.12	6.16	
36	12	7.7	438	1.23	1.70	1.10	0.30	4.33	0.00	2.67	1.25	0.30	4.22		1.29	
				24.65	20.66	25.30	11.73				0.00	162.87	44.31	14.41	303.93	314.56
				0.62	0.85	1.10	0.30				0.00	2.67	1.25	0.15	6.94	
37	13	9.4	4087	0.80	1.80	35.56	2.20	40.36	5.12	18.82	8.50	6.86	39.30		1.33	
				16.03	21.87	817.88	86.02				153.60	1148.02	301.33	329.49	2874.23	2931.72
				0.40	0.90	35.56	2.20				2.56	18.82	8.50	3.43	72.37	
38	14	7.9	1499	0.98	2.91	10.50	0.41	14.80	0.00	11.23	2.95	0.24	14.42		1.30	
				19.64	35.36	241.50	16.03				0.00	685.03	104.58	11.53	1113.66	1141.50
				0.49	1.46	10.50	0.41				0.00	11.23	2.95	0.12	27.16	
39	15	9.3	9629	0.80	7.26	80.66	6.37	95.09	12.00	33.27	22.00	25.37	92.64		1.31	
				16.03	88.21	1855.18	249.07				360.00	2029.47	779.90	1218.52	6596.38	6728.31
				0.40	3.63	80.66	6.37				6.00	33.27	22.00	12.69	165.02	
40	16	8.1	664	0.90	1.10	4.15	0.23	6.38	0.00	3.50	2.80	0.26	6.56		1.39	
				18.04	13.37	95.45	8.99				0.00	213.50	99.26	12.49	461.09	474.92
				0.45	0.55	4.15	0.23				0.00	3.50	2.80	0.13	11.81	
41	17	9.7	9301	0.50	9.50	74.43	7.42	91.85	5.12	24.46	31.42	28.64	89.64		1.22	
				10.02	115.43	1711.89	290.12				153.60	1492.06	1113.84	1375.58	6262.54	6387.79
				0.25	4.75	74.43	7.42				2.56	24.46	31.42	14.32	159.61	
42	28	7.9	2532	2.55	17.50	4.70	0.26	25.01	0.00	12.62	8.50	3.24	24.36		1.32	
				51.10	212.63	108.10	10.17				0.00	769.82	301.33	155.62	1608.76	1640.93
				1.28	8.75	4.70	0.26				0.00	12.62	8.50	1.62	37.73	
43	36	9.2	3256	0.30	2.95	25.98	2.93	32.16	4.20	15.31	8.62	3.20	31.33		1.31	
				6.01	35.84	597.54	114.56				126.00	933.91	305.58	153.70	2273.14	2318.61
				0.15	1.48	25.98	2.93				2.10	15.31	8.62	1.60	58.17	

Cuadro A4. Valores de pHc calculados de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

Muestreo	No.	Estación	$pK_2' - pK_c'$	pCa+Mg	pAlk	pHc
Primavera	1	5	2.27	2.47	2.18	6.9
	2	6	2.24	2.64	2.39	7.3
	3	10	2.17	3.12	2.72	8.0
	4	11	2.17	3.11	2.74	8.0
	5	16	2.22	3.20	2.47	7.9
	6	18	2.31	2.80	2.17	7.3
	7	19	2.33	2.47	2.05	6.9
	8	20	2.23	2.82	2.41	7.5
	9	21	2.27	2.58	2.22	7.1
	10	22	2.13	3.52	3.24	8.9
	11	24	2.15	3.62	2.89	8.7
	12	25	2.16	3.57	2.76	8.5
	13	26	2.18	3.46	2.72	8.4
	14	30	2.32	2.49	1.98	6.8
	15	31	2.31	2.56	2.07	6.9
	16	32	2.25	2.96	2.25	7.5
	17	33	2.25	2.95	2.30	7.5
	18	34	2.25	2.98	2.31	7.5
	19	37	2.22	2.78	2.46	7.5
	20	38	2.19	3.28	2.59	8.1
	21	39	2.16	3.29	2.79	8.2
	22	40	2.16	3.33	2.81	8.3
	23	41	2.16	3.40	2.93	8.5
	24	42	2.17	3.28	2.78	8.2
	25	43	2.16	3.29	2.80	8.3
	26	44	2.33	2.40	1.97	6.7
	27	45	2.22	3.41	2.47	8.1
	28	46	2.26	3.30	2.29	7.8
Otoño	29	3	2.24	2.62	2.43	7.3
	30	4	2.12	3.60	3.54	9.3
	31	5	2.30	2.27	2.06	6.6
	32	7	2.23	2.56	2.37	7.2
	33	8	2.19	2.90	2.68	7.8
	34	9	2.19	2.90	2.65	7.7
	35	11	2.19	2.87	2.63	7.7
	36	12	2.20	2.83	2.57	7.6
	37	13	2.43	2.89	1.62	6.9
	38	14	2.31	2.71	1.95	7.0
	39	15	2.56	2.39	1.34	6.3
	40	16	2.23	3.00	2.46	7.7
	41	17	2.55	2.30	1.53	6.4
	42	28	2.37	2.00	1.90	6.3
	43	36	2.40	2.79	1.71	6.9

Cuadro A5. Valores del PSI con base en las distintas formulaciones de la RAS y en los valores de K de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

Muestreo	No.	Estación	RAS	PSI			RASaj	PSI			RAS°	PSI		
				0.01000	0.01152	0.01690		0.01000	0.01152	0.01690		0.01000	0.01152	0.01690
Primavera	1	5	1.27	1.25	1.44	2.10	3.16	3.06	3.51	5.06	1.34	1.33	1.52	2.22
	2	6	1.32	1.31	1.50	2.19	2.82	2.75	3.15	4.56	1.36	1.34	1.54	2.25
	3	10	1.35	1.34	1.54	2.24	1.88	1.84	2.12	3.07	1.25	1.23	1.42	2.06
	4	11	1.24	1.22	1.41	2.05	1.71	1.68	1.93	2.81	1.12	1.11	1.27	1.85
	5	16	5.17	4.91	5.62	8.03	7.81	7.24	8.25	11.66	4.99	4.75	5.44	7.78
	6	18	8.41	7.75	8.83	12.44	17.83	15.13	17.04	23.16	9.35	8.55	9.73	13.65
	7	19	5.58	5.28	6.04	8.61	14.20	12.44	14.06	19.36	6.73	6.30	7.19	10.21
	8	20	2.57	2.51	2.88	4.16	4.98	4.74	5.43	7.76	2.68	2.61	3.00	4.34
	9	21	2.56	2.50	2.86	4.15	5.96	5.62	6.42	9.15	2.89	2.81	3.22	4.66
	10	22	0.62	0.62	0.71	1.04	0.32	0.32	0.37	0.54	0.43	0.42	0.49	0.72
	11	24	2.43	2.37	2.72	3.94	1.80	1.77	2.03	2.95	1.91	1.87	2.15	3.12
	12	25	3.25	3.15	3.61	5.21	2.94	2.86	3.28	4.73	2.61	2.54	2.92	4.22
	13	26	3.86	3.72	4.26	6.13	4.02	3.86	4.43	6.36	3.33	3.22	3.69	5.33
	14	30	5.11	4.86	5.56	7.95	13.34	11.77	13.32	18.40	5.90	5.57	6.36	9.06
	15	31	5.17	4.91	5.62	8.03	12.74	11.30	12.80	17.72	5.81	5.49	6.28	8.94
	16	32	5.71	5.40	6.17	8.80	11.04	9.94	11.29	15.73	6.04	5.69	6.50	9.26
	17	33	5.20	4.94	5.65	8.07	9.89	9.00	10.23	14.31	5.46	5.18	5.92	8.45
	18	34	5.28	5.01	5.73	8.19	9.82	8.95	10.17	14.24	5.48	5.19	5.94	8.47
	19	37	1.44	1.42	1.63	2.38	2.79	2.72	3.12	4.51	1.40	1.39	1.59	2.32
	20	38	3.35	3.24	3.72	5.36	4.50	4.30	4.93	7.06	3.11	3.02	3.46	5.00
	21	39	1.64	1.61	1.85	2.69	1.90	1.86	2.14	3.11	1.41	1.39	1.60	2.33
	22	40	1.66	1.64	1.88	2.73	1.83	1.80	2.06	3.00	1.40	1.38	1.59	2.32
	23	41	1.94	1.91	2.19	3.18	1.78	1.75	2.01	2.92	1.52	1.50	1.72	2.50
	24	42	1.79	1.75	2.02	2.93	2.10	2.06	2.37	3.43	1.55	1.53	1.76	2.56
	25	43	1.65	1.63	1.87	2.72	1.89	1.86	2.14	3.10	1.43	1.41	1.62	2.36
	26	44	4.71	4.49	5.14	7.37	12.69	11.26	12.76	17.66	4.91	4.68	5.35	7.66
	27	45	6.97	6.51	7.43	10.53	9.12	8.36	9.51	13.35	6.48	6.09	6.95	9.88
	28	46	10.53	9.52	10.82	15.10	16.41	14.10	15.90	21.71	10.09	9.16	10.41	14.56
Otoño	29	3	1.44	1.42	1.64	2.38	3.05	2.96	3.40	4.91	1.59	1.56	1.79	2.61
	30	4	0.44	0.44	0.50	0.74	0.06	0.06	0.07	0.11	0.22	0.22	0.25	0.37
	31	5	1.06	1.05	1.20	1.76	2.93	2.84	3.26	4.71	1.26	1.24	1.43	2.08
	32	7	0.62	0.61	0.70	1.03	1.38	1.36	1.56	2.27	0.72	0.71	0.82	1.20
	33	8	0.76	0.75	0.87	1.27	1.24	1.23	1.41	2.06	0.76	0.76	0.87	1.27
	34	9	0.75	0.74	0.86	1.25	1.25	1.23	1.42	2.07	0.75	0.75	0.86	1.25
	35	11	0.83	0.82	0.94	1.38	1.41	1.39	1.60	2.32	0.85	0.84	0.97	1.42
	36	12	0.91	0.90	1.04	1.51	1.63	1.60	1.84	2.68	0.92	0.91	1.05	1.54
	37	13	31.19	23.77	26.44	34.52	76.72	43.41	46.92	56.46	34.46	25.63	28.42	36.80
	38	14	7.53	7.00	7.98	11.29	18.28	15.46	17.40	23.61	8.08	7.47	8.51	12.01
	39	15	40.18	28.66	31.64	40.44	124.55	55.47	58.93	67.79	41.54	29.35	32.37	41.25
	40	16	4.15	3.98	4.56	6.55	7.11	6.64	7.57	10.73	4.26	4.08	4.68	6.71
	41	17	33.29	24.97	27.72	36.00	100.41	50.10	53.64	62.92	33.66	25.18	27.94	36.26
	42	28	1.48	1.46	1.68	2.45	4.64	4.44	5.08	7.27	1.55	1.53	1.76	2.56
	43	36	20.38	16.93	19.02	25.62	51.04	33.79	37.03	46.31	20.57	17.06	19.16	25.80

Cuadro A6. Conductividad eléctrica experimental y teórica de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

Muestreo	No.	Estación	CE <sub>experimental</sub> μS cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	CE <sub>teórica</sub> μS cm <sup>-1</sup>	Rango
Primavera	1	5	1007	1.52	5.31	2.34	0.78	9.95	0.00	6.68	2.54	0.47	9.69		
				79	247	114	56			0	291	35		1016	1.0
	2	6	714	1.12	3.45	2.00	0.48	7.05	0.00	4.09	2.36	0.40	6.85		
				58	161	98	35			0	178	30		738	1.0
	3	10	285	0.42	1.10	1.18	0.11	2.81	0.10	1.80	0.75	0.08	2.73		
				22	51	58	8			8	78	6		288	1.0
	4	11	277	0.30	1.25	1.09	0.10	2.74	0.25	1.58	0.72	0.12	2.67		
				16	58	53	7			21	69	9		288	1.0
	5	16	566	0.58	0.68	4.10	0.23	5.59	0.10	3.30	1.72	0.30	5.42		
				30	32	200	17			8	144	22		584	1.0
	6	18	1420	1.40	1.78	10.60	0.24	14.02	0.60	6.10	3.35	3.58	13.63		
				73	83	518	17			51	266	254	265	1527	0.9
	7	19	1814	3.20	3.60	10.28	0.84	17.92	0.00	8.84	6.28	2.34	17.46		
				166	168	503	60			0	385	477	173	1932	0.9
	8	20	661	1.12	1.92	3.17	0.32	6.53	0.00	3.85	1.35	1.12	6.32		
				58	89	155	23			0	168	102	83	679	1.0
	9	21	956	2.25	2.96	4.13	0.10	9.44	0.00	6.02	2.84	0.30	9.16		
				117	138	202	7			0	262	216	22	964	1.0
	10	22	100	0.18	0.42	0.34	0.04	0.98	0.06	0.52	0.28	0.10	0.96		
				9	20	17	3			5	23	21	7	105	1.0
	11	24	190	0.20	0.28	1.19	0.20	1.87	0.04	1.25	0.35	0.18	1.82		
				10	13	58	14			3	55	27	13	194	1.0
	12	25	248	0.22	0.32	1.69	0.22	2.45	0.06	1.66	0.45	0.20	2.37		
				11	15	83	16			5	72	34	15	251	1.0
	13	26	312	0.28	0.41	2.27	0.12	3.08	0.07	1.84	0.85	0.21	2.97		
				15	19	111	9			6	80	65	16	319	1.0
	14	30	1623	2.48	4.04	9.23	0.28	16.03	0.90	9.51	3.15	2.05	15.61		
				129	188	451	20			76	415	239	151	1670	1.0
15	31	1452	2.10	3.45	8.61	0.18	14.34	0.62	7.91	3.10	2.24	13.87			
			109	161	421	13			52	345	235	166	1502	1.0	
16	32	848	0.80	1.40	5.99	0.18	8.37	0.12	5.46	2.04	0.48	8.10			
			42	65	293	13			10	238	155	35	851	1.0	
17	33	800	0.76	1.48	5.50	0.16	7.90	0.24	4.80	2.00	0.58	7.62			
			40	69	269	12			20	209	152	43	813	1.0	
18	34	775	0.80	1.30	5.41	0.14	7.65	0.14	4.72	2.05	0.46	7.37			
			42	61	265	10			12	206	156	34	784	1.0	
19	37	532	0.25	3.05	1.85	0.10	5.25	0.15	3.30	1.24	0.42	5.11			
			13	142	90	7			13	144	94	31	535	1.0	
20	38	369	0.48	0.58	2.44	0.14	3.64	0.06	2.49	0.68	0.32	3.55			
			25	27	119	10			5	109	52	24	370	1.0	
21	39	234	0.44	0.58	1.17	0.12	2.31	0.08	1.55	0.35	0.26	2.24			
			23	27	57	9			7	68	27	19	236	1.0	
22	40	221	0.42	0.52	1.14	0.10	2.18	0.08	1.46	0.42	0.16	2.12			
			22	24	56	7			7	64	32	12	223	1.0	
23	41	214	0.38	0.42	1.23	0.08	2.11	0.06	1.12	0.50	0.38	2.06			
			20	20	60	6			5	49	38	28	225	1.0	
24	42	249	0.48	0.58	1.30	0.10	2.46	0.10	1.56	0.50	0.24	2.40			
			25	27	64	7			8	68	38	18	255	1.0	
25	43	235	0.46	0.56	1.18	0.12	2.32	0.09	1.50	0.55	0.22	2.36			
			24	26	58	9			8	65	42	16	247	0.9	
26	44	1833	1.25	6.75	9.41	0.69	18.10	1.50	9.17	6.50	0.46	17.63			
			65	315	460	50			127	400	493	34	1943	0.9	
27	45	550	0.30	0.48	4.35	0.30	5.43	0.00	3.42	1.17	0.70	5.29			
			16	22	213	22			0	149	89	52	562	1.0	
28	46	942	0.36	0.65	7.48	0.81	9.30	0.00	5.17	2.80	1.07	9.04			
			19	30	366	58			0	225	213	79	990	1.0	
Oroño	29	3	731	2.20	2.65	2.25	0.12	7.22	0.00	3.72	2.35	0.94	7.01		
				114	123	110	9			0	162	178	69	767	1.0
	30	4	79	0.32	0.18	0.22	0.06	0.78	0.00	0.29	0.18	0.29	0.76		
				17	8	11	4			0	13	14	21	88	0.9
	31	5	1398	4.50	6.15	2.44	0.72	13.81	0.00	8.75	3.55	1.14	13.44		
				234	287	119	52			0	382	269	84	1427	1.0
	32	7	677	3.18	2.30	1.02	0.19	6.69	0.00	4.27	1.95	0.27	6.49		
				165	107	50	14			0	186	148	20	690	1.0
	33	8	362	1.45	1.05	0.85	0.23	3.58	0.00	2.11	1.12	0.26	3.49		
				75	49	42	17			0	92	85	19	379	1.0
	34	9	363	1.31	1.20	0.84	0.22	3.57	0.00	2.26	0.95	0.27	3.48		
				68	56	41	16			0	99	72	20	372	1.0
	35	11	392	1.60	1.10	0.96	0.21	3.87	0.00	2.32	1.20	0.24	3.76		
				83	51	47	15			0	101	91	18	406	1.0
	36	12	438	1.23	1.70	1.10	0.30	4.33	0.00	2.67	1.25	0.30	4.22		
				64	79	54	22			0	116	95	22	452	1.0
	37	13	4087	0.80	1.80	35.56	2.20	40.36	5.12	18.82	8.50	6.86	39.30		
				42	84	1739	158			433	821	645	507	4429	0.9
	38	14	1499	0.98	2.91	10.50	0.41	14.80	0.00	11.23	2.95	0.24	14.42		
				51	136	513	30			0	490	224	18	1461	1.0
	39	15	9629	0.80	7.26	80.66	6.37	95.09	12.00	33.27	22.00	25.37	92.64		
				42	338	3944	459			1015	1451	1670	1875	10793	0.9
	40	16	664	0.90	1.10	4.15	0.23	6.38	0.00	3.50	2.80	0.26	6.56		
				47	51	203	17			0	153	213	19	702	0.9
	41	17	9301	0.50	9.50	74.43	7.42	91.85	5.12	24.46	31.42	28.64	89.64		
			26	443	3640	534			433	1066	2385	2116	10643	0.9	
42	28	2532	2.55	17.50	4.70	0.26	25.01	0.00	12.62	8.50	3.24	24.36			
			133	816	230	19			0	550	645	239	2631	1.0	
43	36	3256	0.30	2.95	25.98	2.93	32.16	4.20	15.31	8.62	3.20	31.33			
			16	137	1270	211			355	668	654	236	3548	0.9	

Cuadro A7. Presión osmótica experimental y teórica de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

Muestreo	No.	Estación	pH	CE	STD	$\pi_{\text{Teórica}}$	$\pi_{\text{Experimental}}$
				$\mu\text{S cm}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$	$\pi = nRT$	$\pi = 0.0004/0.6826 \text{ STD}$
Primavera	1	5	8.2	1007	716.88	0.391	0.420
	2	6	8.2	714	496.42	0.279	0.291
	3	10	8.6	285	203.52	0.115	0.119
	4	11	8.8	277	191.83	0.109	0.112
	5	16	9.1	566	415.35	0.249	0.243
	6	18	8.8	1420	1009.25	0.586	0.591
	7	19	7.8	1814	1282.69	0.754	0.752
	8	20	8.1	661	482.19	0.263	0.283
	9	21	8.2	956	682.13	0.388	0.400
	10	22	8.6	100	69.00	0.038	0.040
	11	24	9.0	190	146.61	0.082	0.086
	12	25	9.0	248	190.84	0.108	0.112
	13	26	9.1	312	229.83	0.136	0.135
	14	30	8.4	1623	1167.74	0.658	0.684
	15	31	8.4	1452	1032.85	0.587	0.605
	16	32	8.9	848	628.18	0.369	0.368
	17	33	9.1	800	581.67	0.342	0.341
	18	34	8.4	775	565.08	0.334	0.331
	19	37	8.7	532	369.21	0.206	0.216
	20	38	8.9	369	280.93	0.158	0.165
	21	39	9.0	234	175.24	0.095	0.103
	22	40	8.7	221	164.46	0.091	0.096
	23	41	8.6	214	155.49	0.087	0.091
	24	42	9.0	249	184.11	0.102	0.108
	25	43	9.1	235	178.14	0.098	0.104
	26	44	8.5	1833	1237.54	0.752	0.725
	27	45	7.6	550	419.56	0.244	0.246
	28	46	7.8	942	705.39	0.423	0.413
Otoño	29	3	7.9	731	502.75	0.277	0.295
	30	4	8.1	79	56.17	0.028	0.033
	31	5	7.2	1398	987.61	0.522	0.579
	32	7	7.2	677	479.08	0.252	0.281
	33	8	7.3	362	260.05	0.139	0.152
	34	9	7.7	363	262.12	0.138	0.154
	35	11	7.3	392	280.80	0.151	0.165
	36	12	7.7	438	314.56	0.170	0.184
	37	13	9.4	4087	2931.72	1.771	1.718
	38	14	7.9	1499	1141.50	0.664	0.669
	39	15	9.3	9629	6728.31	4.037	3.943
	40	16	8.1	664	474.92	0.289	0.278
	41	17	9.7	9301	6387.79	3.905	3.743
	42	28	7.9	2532	1640.93	0.923	0.962
	43	36	9.2	3256	2318.61	1.423	1.359

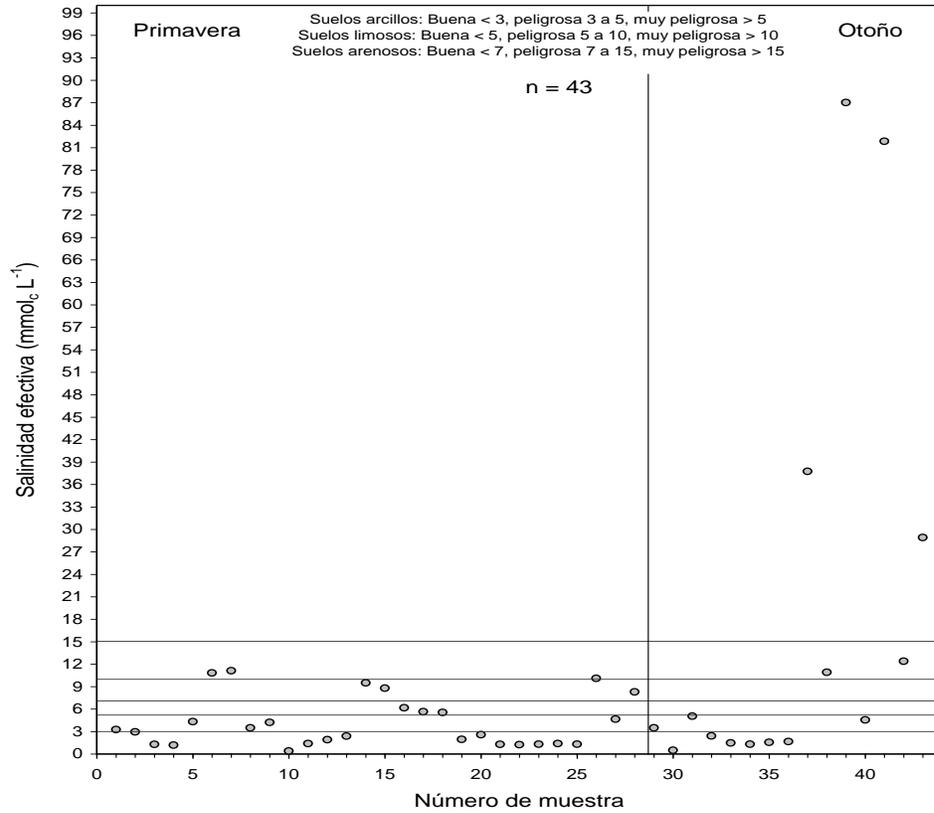


Figura A1. Salinidad efectiva de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

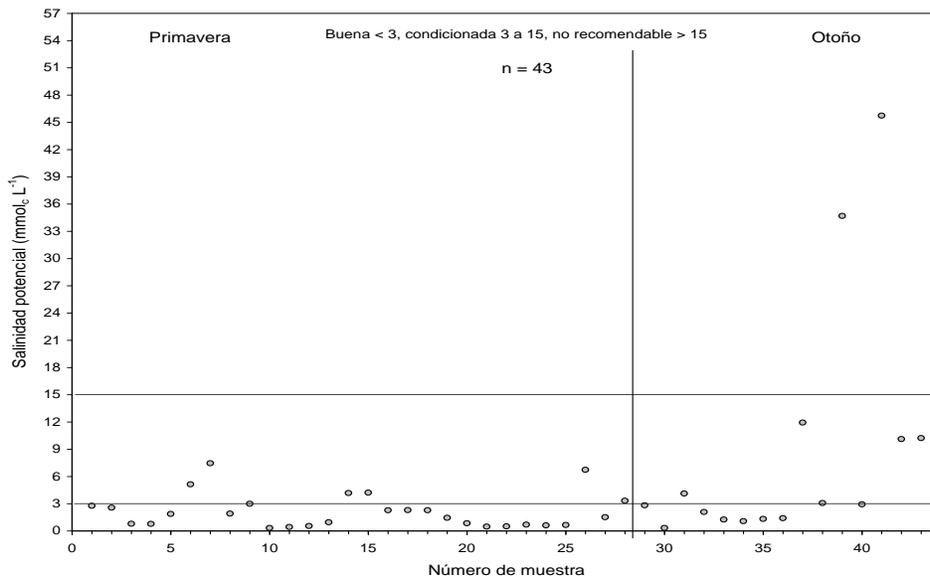


Figura A2. Salinidad potencial de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

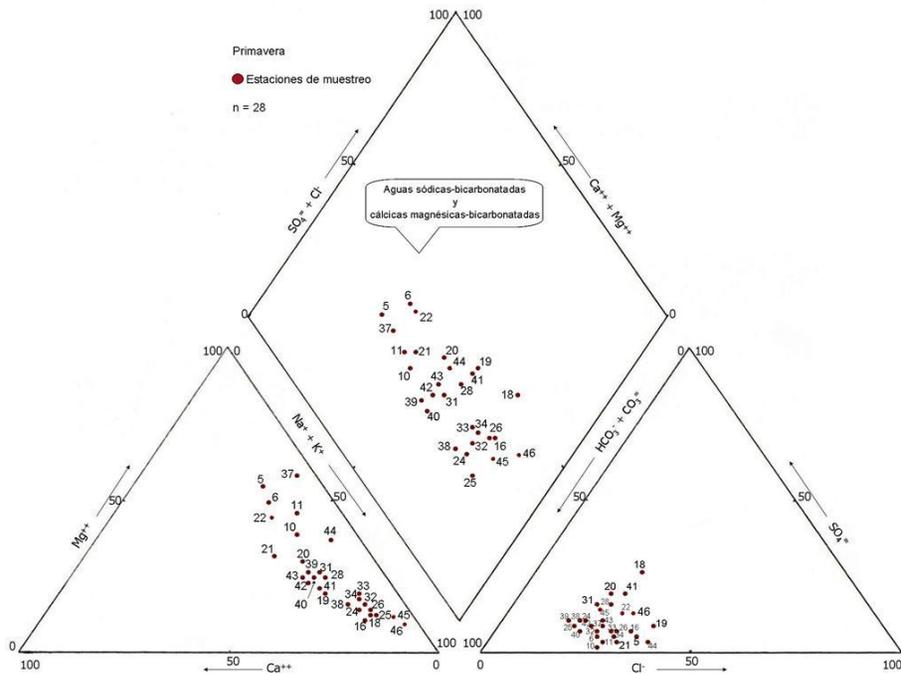


Figura A3. Clasificación hidrogeoquímica de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera 2008.

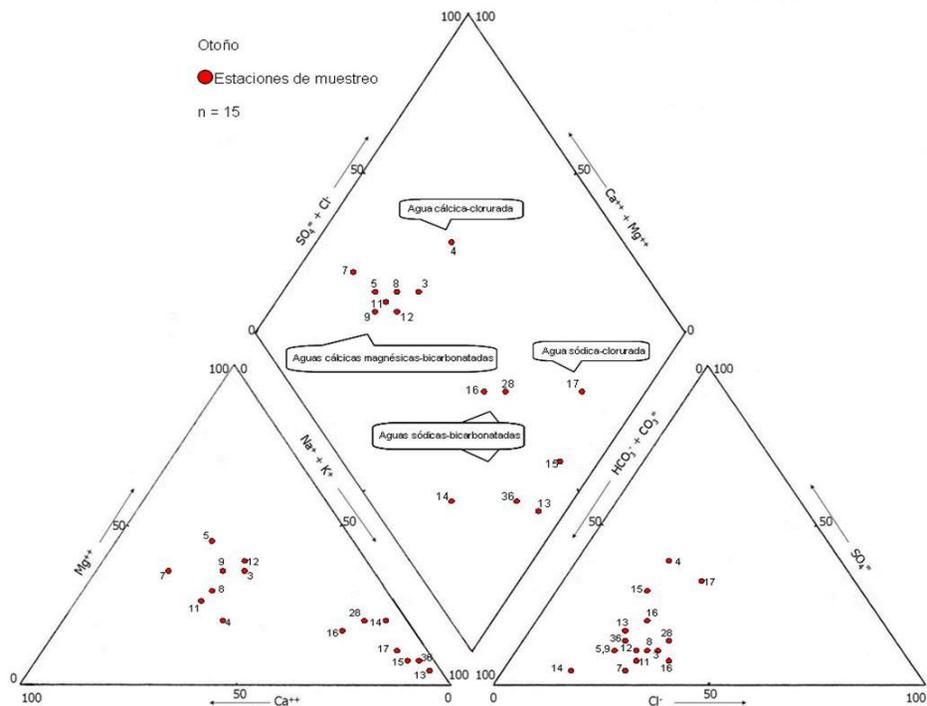


Figura A4. Clasificación hidrogeoquímica de las aguas de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Otoño 2008.

## Anexo B. Lagos cráter de la Cuenca del Oriental

Cuadro B1. Concentración iónica de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

Muestreo	No.	Estación	pH	CE $\mu S\ cm^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma cationes	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma aniones	Suma mg L <sup>-1</sup> /mmol L <sup>-1</sup>	Error %	STD mg L <sup>-1</sup>
Primavera	1	1	9.1	1250	0.47	2.34	8.79	0.74	12.34	1.75	6.03	1.77	2.42	11.98		1.48	
					9.40	28.49	202.08	28.95		52.62	367.73	62.85	116.46	868.57	894.63		
					0.23	1.17	8.79	0.74		0.88	6.03	1.77	1.21	20.82			
	2	2	9.5	3624	0.84	8.69	21.60	4.64	35.77	6.55	21.47	5.99	0.84	34.85		1.30	
					16.77	105.61	496.75	181.54		196.55	1309.52	212.49	40.17	2559.42	2623.40		
					0.42	4.35	21.60	4.64		3.28	21.47	5.99	0.42	62.16			
	3	23	8.8	11775	4.74	14.60	92.67	4.23	116.24	2.90	12.05	94.66	3.62	113.23		1.31	
					95.04	177.39	2131.33	165.44		86.96	734.91	3355.71	174.03	6920.80	7059.22		
					2.37	7.30	92.67	4.23		1.45	12.05	94.66	1.81	216.54			
	4	27	9.1	830	0.35	3.30	4.11	0.43	8.19	0.62	3.57	2.93	0.87	7.98		1.30	
					6.96	40.12	94.56	16.78		18.48	217.49	103.99	41.55	539.94	558.83		
					0.17	1.65	4.11	0.43		0.31	3.57	2.93	0.43	13.60			
5	29	8.9	2303	0.42	8.25	13.02	1.06	22.74	1.71	5.29	8.86	5.47	21.32		3.22		
				8.39	100.24	299.38	41.26		51.17	322.53	314.11	262.55	1399.61	1441.60			
				0.21	4.13	13.02	1.06		0.85	5.29	8.86	2.73	36.14				
6	35	9.1	13258	0.46	19.18	99.59	8.32	127.55	8.17	16.71	93.22	12.83	130.93		1.31		
				9.20	233.08	2290.59	325.17		245.10	1019.11	3304.73	616.28	8043.25	8204.12			
				0.23	9.59	99.59	8.32		4.09	16.71	93.22	6.42	238.16				
Otoño	7	1	9.2	1387	0.51	2.89	9.54	0.77	13.70	1.92	6.80	1.86	2.75	13.34		1.33	
					10.21	35.09	219.31	30.00		57.63	415.01	66.02	132.24	965.51	994.47		
					0.25	1.44	9.54	0.77		0.96	6.80	1.86	1.38	23.00			
	8	2	9.5	3625	0.80	7.39	23.10	4.51	35.80	7.07	20.74	6.22	0.82	34.84		1.36	
					16.07	89.78	531.26	176.37		211.97	1264.94	220.34	39.49	2550.22	2613.97		
					0.40	3.69	23.10	4.51		3.53	20.74	6.22	0.41	62.60			
	9	23	9.2	10780	4.22	13.07	85.42	3.75	106.46	2.74	10.08	87.70	3.15	103.67		1.33	
					84.48	158.84	1964.74	146.52		82.11	614.68	3109.14	151.37	6311.88	6438.12		
					2.11	6.54	85.42	3.75		1.37	10.08	87.70	1.58	198.54			
	10	27	9.0	955	0.46	3.74	4.72	0.51	9.43	0.63	4.20	3.28	1.08	9.18		1.34	
					9.15	45.46	108.53	20.06		18.84	256.02	116.24	51.68	625.98	647.89		
					0.23	1.87	4.72	0.51		0.31	4.20	3.28	0.54	15.66			
11	29	9.1	2400	0.43	8.91	13.28	1.08	23.70	1.80	5.68	9.79	5.84	23.11		1.26		
				8.55	108.27	305.47	42.26		54.08	346.22	347.03	280.60	1492.49	1537.26			
				0.21	4.46	13.28	1.08		0.90	5.68	9.79	2.92	38.32				
12	35	9.2	12516	0.57	19.30	100.59	8.57	129.03	8.89	16.98	93.75	12.64	132.26		1.24		
				11.38	234.53	2313.61	334.99		266.64	1035.91	3323.29	607.29	8127.65	8290.20			
				0.28	9.65	100.59	8.57		4.44	16.98	93.75	6.32	240.59				

Cuadro B2. Valores de pHc calculados de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

Muestreo	No.	Estación	$pK_2' - pK_c'$	pCa+Mg	pAlk	pHc
Primavera	1	1	2.03	2.85	2.11	7.0
	2	2	2.03	2.32	1.55	5.9
	3	23	2.03	2.01	1.83	5.9
	4	27	2.03	2.74	2.38	7.1
	5	29	2.03	2.36	2.16	6.5
	6	35	2.03	2.01	1.60	5.6
Otoño	7	1	2.03	2.77	2.06	6.9
	8	2	2.03	2.39	1.56	6.0
	9	23	2.03	2.06	1.89	6.0
	10	27	2.03	2.68	2.32	7.0
	11	29	2.03	2.33	2.13	6.5
	12	35	2.03	2.00	1.59	5.6

Cuadro B3. Valores del PSI con base en las distintas formulaciones de la RAS y en los valores de K de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

Muestreo	No.	Estación	RAS	PSI			RASaj	PSI			RAS <sup>o</sup>	PSI		
				0.01000	0.01152	0.01690		0.01000	0.01152	0.01690		0.01000	0.01152	0.01690
Primavera		1	7.41	6.90	7.86	11.13	17.87	15.16	17.07	23.20	7.41	6.90	7.86	11.12
		2	9.89	9.00	10.23	14.33	34.62	25.72	28.51	36.91	10.21	9.27	10.53	14.72
		23	29.80	22.96	25.56	33.49	105.28	51.29	54.81	64.02	32.69	24.64	27.36	35.59
		27	3.04	2.95	3.39	4.89	6.87	6.42	7.33	10.40	3.01	2.92	3.35	4.84
		29	6.25	5.88	6.72	9.56	17.85	15.14	17.06	23.17	6.23	5.86	6.70	9.53
		35	31.78	24.12	26.80	34.94	119.52	54.45	57.93	66.89	31.92	24.20	26.89	35.04
Otoño		1	7.32	6.82	7.77	11.00	18.61	15.69	17.66	23.93	7.36	6.85	7.82	11.06
		2	11.41	10.24	11.62	16.17	39.14	28.13	31.08	39.81	11.82	10.57	11.99	16.65
		23	29.05	22.51	25.08	32.93	99.29	49.82	53.36	62.66	31.68	24.06	26.74	34.87
		27	3.26	3.15	3.62	5.22	7.75	7.19	8.19	11.58	3.28	3.18	3.64	5.26
		29	6.15	5.79	6.61	9.41	17.92	15.20	17.12	23.25	6.13	5.78	6.60	9.39
		35	31.91	24.19	26.88	35.04	120.73	54.70	58.18	67.11	32.15	24.33	27.03	35.20

Cuadro B4. Conductividad eléctrica experimental y teórica de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

Muestreo	No.	Estación	CE <sub>experimental</sub> μS cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	CE <sub>teórica</sub> μS cm <sup>-1</sup>	Rango
Primavera	1	1	1250	0.47 24	2.34 109	8.79 430	0.74 53	12.34	1.75 148	6.03 263	1.77 135	2.42 179	11.98	1342	0.9
	2	2	3624	0.84 44	8.69 405	21.60 1056	4.64 334	35.77	6.55 554	21.47 936	5.99 455	0.84 62	34.85	3846	0.9
	3	23	11775	4.74 247	14.60 680	92.67 4531	4.23 305	116.24	2.90 245	12.05 525	94.66 7185	3.62 268	113.23	13986	0.8
	4	27	830	0.35 18	3.30 154	4.11 201	0.43 31	8.19	0.62 52	3.57 155	2.93 223	0.87 64	7.98	898	0.9
	5	29	2303	0.42 22	8.25 384	13.02 637	1.06 76	22.74	1.71 144	5.29 231	8.86 673	5.47 404	21.32	2570	0.9
	6	35	13258	0.46 24	19.18 894	99.59 4870	8.32 599	127.55	8.17 691	16.71 728	93.22 7076	12.83 948	130.93	15830	0.8
Otoño	7	1	1387	0.51 27	2.89 135	9.54 466	0.77 55	13.70	1.92 163	6.80 297	1.86 141	2.75 203	13.34	1487	0.9
	8	2	3625	0.80 42	7.39 344	23.10 1130	4.51 325	35.80	7.07 598	20.74 904	6.22 472	0.82 61	34.84	3875	0.9
	9	23	10780	4.22 219	13.07 609	85.42 4177	3.75 270	106.46	2.74 232	10.08 439	87.70 6657	3.15 233	103.67	12836	0.8
	10	27	955	0.46 24	3.74 174	4.72 231	0.51 37	9.43	0.63 53	4.20 183	3.28 183	1.08 80	9.18	1030	0.9
	11	29	2400	0.43 22	8.91 415	13.28 649	1.08 78	23.70	1.80 152	5.68 247	9.79 743	5.84 432	23.11	2739	0.9
	12	35	12516	0.57 30	19.30 900	100.59 4919	8.57 617	129.03	8.89 752	16.98 740	93.75 7115	12.64 934	132.26	16007	0.8

Cuadro B5. Presión osmótica experimental y teórica de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

Muestreo	No.	Estación	pH	CE μS cm <sup>-1</sup>	STD mg L <sup>-1</sup>	π <sub>Teórica</sub> π = nRT atm	π <sub>Experimental</sub> π = 0.0004/0.6267 STD atm
Primavera	1	1	9.1	1250	894.63	0.509	0.571
	2	2	9.5	3624	2623.40	1.521	1.674
	3	23	8.8	11775	7059.22	5.298	4.506
	4	27	9.1	830	558.83	0.333	0.357
	5	29	8.9	2303	1441.60	0.884	0.920
	6	35	9.1	13258	8204.12	5.827	5.236
Otoño	7	1	9.20	1387	994.47	0.566	0.635
	8	2	9.50	3625	2613.97	1.548	1.668
	9	23	9.20	10780	6438.12	4.938	4.109
	10	27	9.00	955	647.89	0.391	0.414
	11	29	9.10	2400	1537.26	0.956	0.981
	12	35	9.20	12516	8290.20	5.629	5.291



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura B1. Lagos cráter en la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. a) Alchichica, b) Atexcac, c) Quechulac, d) La Preciosa, e) Aljojuca y f) Tecuitlapa.

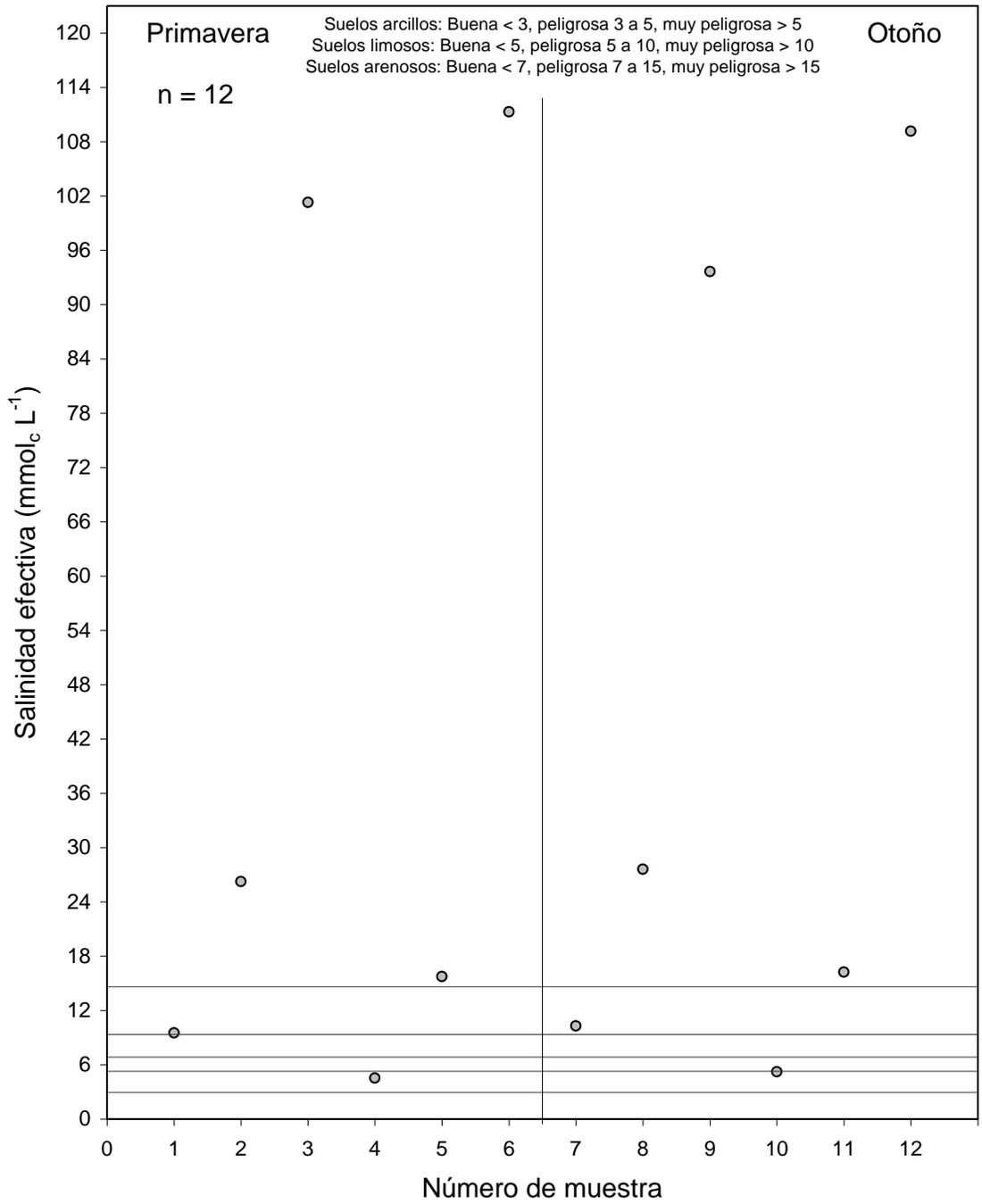


Figura B2. Evaluación de la salinidad efectiva de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.

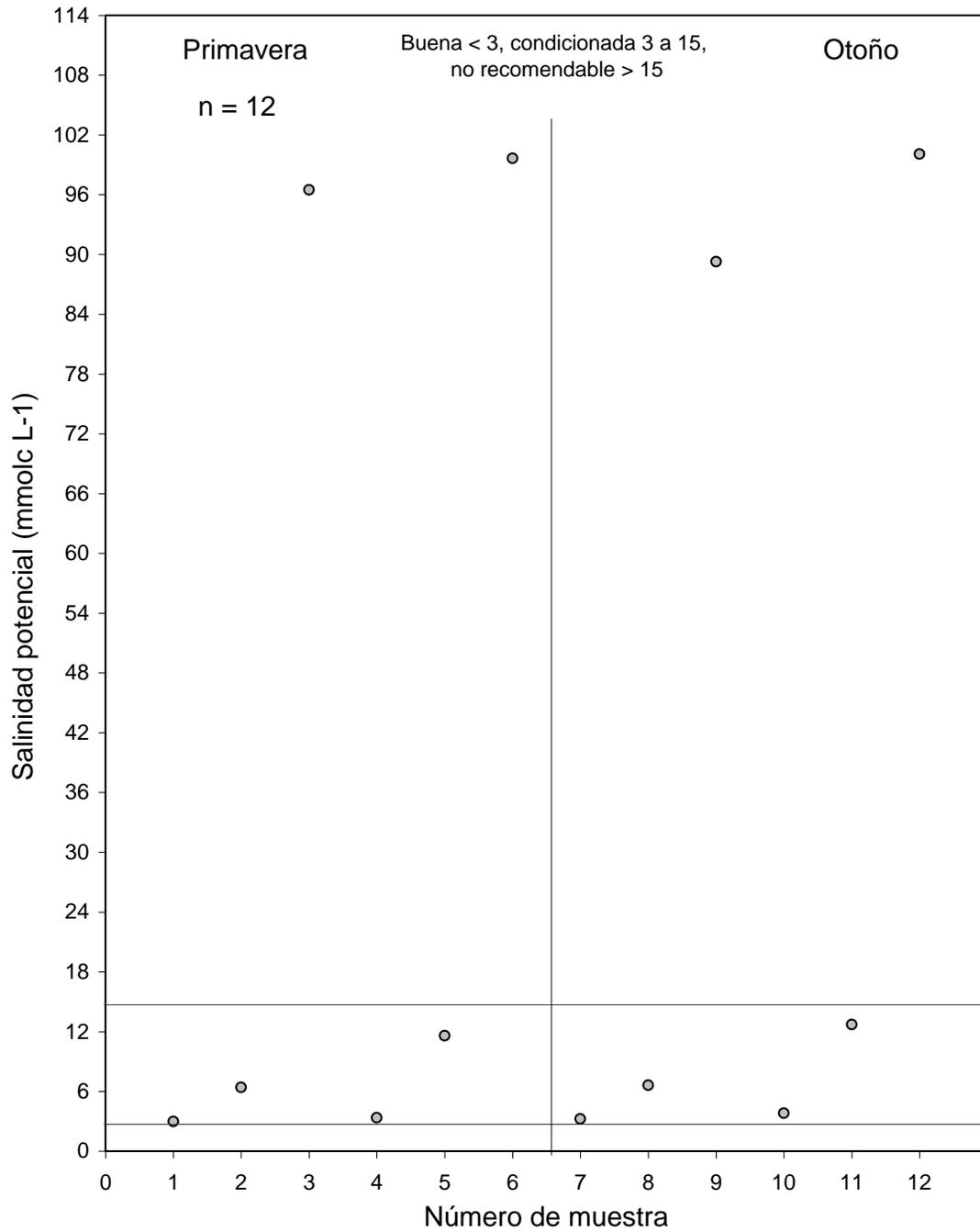


Figura B3. Evaluación de la salinidad potencial de las aguas de los lagos cráter de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Primavera y otoño 2008.



## Anexo C. Suelos de la Cuenca del Oriental

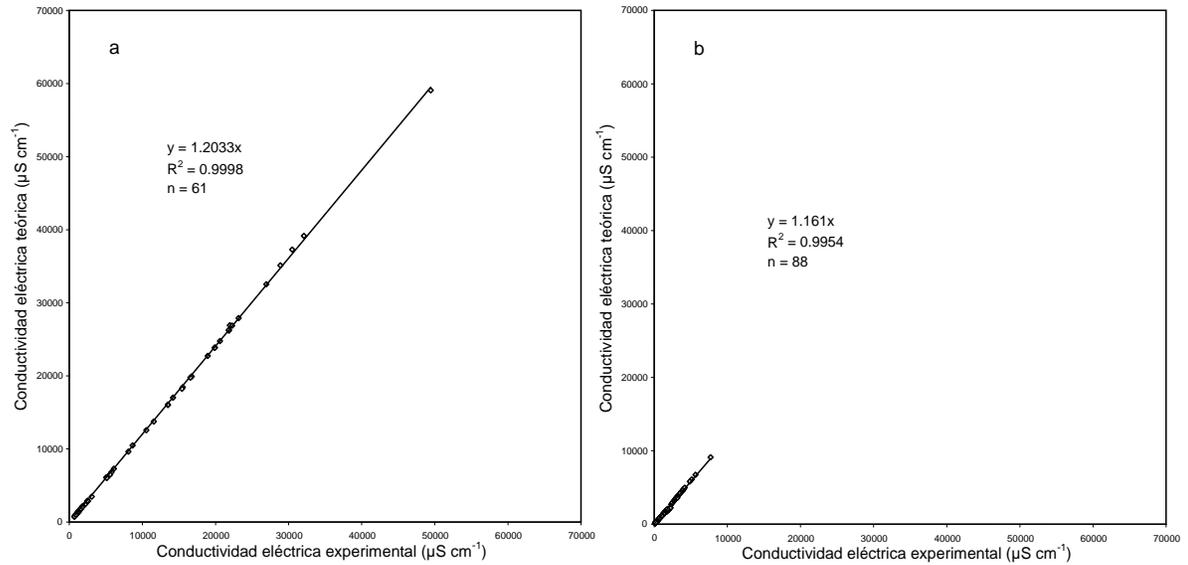


Figura C1. Relación conjunta de la conductividad eléctrica experimental y teórica de los extractos de suelo de la Cuenca del Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. a) Saturación; b) Relación 1:5.

Sales solubles en el extracto 1:~0.2-0.6 (saturación)

Cuadro C1. Concentración iónica en meq/100 g de suelo. Extracto de saturación. Cuenca del Oriental. Perfil 1, Laguna Totolcingo.

Profundidad	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^{+}$	$\text{K}^{+}$	Suma	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{HCO}_3^{-}$	$\text{Cl}^{-}$	$\text{SO}_4^{2-}$	Suma	Error %
							meq/100 g						
000-010	8.0	2189	0.37	0.37	0.44	0.05	1.22	0.00	0.40	0.48	0.31	1.20	1.07
010-020	8.5	1601	0.16	0.37	0.28	0.02	0.84	0.11	0.16	0.34	0.21	0.82	1.07
020-030	8.4	1312	0.12	0.34	0.28	0.02	0.75	0.12	0.18	0.29	0.15	0.73	1.03
030-040	8.5	1135	0.10	0.26	0.19	0.01	0.56	0.05	0.17	0.23	0.11	0.55	1.09
040-050	7.5	1019	0.07	0.24	0.15	0.02	0.49	0.05	0.14	0.19	0.10	0.48	1.03
050-060	7.9	1069	0.06	0.20	0.11	0.03	0.40	0.00	0.15	0.17	0.07	0.39	1.08
060-070	7.9	1113	0.07	0.19	0.11	0.03	0.40	0.00	0.15	0.16	0.08	0.39	1.11
070-080	7.9	1267	0.07	0.25	0.21	0.05	0.57	0.00	0.16	0.23	0.17	0.56	1.18
080-090	8.2	1319	0.14	0.45	0.26	0.04	0.88	0.00	0.27	0.31	0.29	0.86	1.14
090-100	8.3	1299	0.10	0.39	0.27	0.06	0.82	0.00	0.20	0.32	0.27	0.79	1.48
100-110	8.4	1305	0.08	0.32	0.26	0.06	0.73	0.00	0.18	0.28	0.25	0.71	1.38
110-120	8.3	1308	0.09	0.34	0.27	0.07	0.77	0.00	0.17	0.27	0.32	0.75	1.07

Cuadro C2. Concentración iónica en meq/100 g de suelo. Extracto de saturación.  
Cuenca del Oriental. Perfil 3, Laguna Totolcingo.

Profundidad	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma meq/100 g	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	Error %
000-010	9.8	49434	0.01	0.07	17.80	2.40	20.29	1.66	3.32	13.29	1.49	19.76	1.32
010-020	10.1	30495	0.03	0.07	13.78	2.11	15.99	0.71	1.33	12.82	0.73	15.59	1.27
020-030	9.9	21956	0.00	0.04	9.01	1.22	10.26	0.30	0.59	8.71	0.42	10.01	1.22
030-040	9.3	8667	0.02	0.03	3.27	0.47	3.79	0.12	0.48	2.93	0.18	3.71	1.06
040-050	8.5	5521	0.03	0.13	2.03	0.13	2.32	0.06	0.43	1.67	0.11	2.27	1.07
050-060	8.2	5136	0.03	0.25	1.48	0.07	1.83	0.00	0.27	1.42	0.10	1.79	1.06
060-070	8.2	2440	0.03	0.14	0.69	0.03	0.89	0.00	0.16	0.67	0.04	0.87	1.10
070-080	7.8	2504	0.03	0.15	0.68	0.03	0.90	0.00	0.15	0.68	0.05	0.88	1.10
080-090	8.2	6099	0.03	0.23	2.08	0.10	2.44	0.00	0.22	2.03	0.13	2.39	1.07

Cuadro C3. Concentración iónica en meq/100 g de suelo. Extracto de saturación.  
Cuenca del Oriental. Perfil 4, Laguna Totolcingo.

Profundidad	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma meq/100 g	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	Error %
000-010	8.7	3082	0.03	1.44	0.44	0.12	2.03	0.15	0.50	0.60	0.72	1.97	1.47
010-020	8.6	5778	0.04	1.96	1.04	0.17	3.21	0.12	0.21	0.76	2.03	3.12	1.38
020-030	8.5	8089	0.06	2.67	1.92	0.25	4.90	0.12	0.23	1.10	3.34	4.80	1.08
030-040	8.4	10529	0.05	3.23	2.73	0.29	6.30	0.02	0.20	1.63	4.31	6.17	1.06
040-050	8.3	13482	0.07	4.61	4.31	0.38	9.36	0.00	0.26	2.53	6.30	9.09	1.44
050-060	8.3	15536	0.14	6.34	5.21	0.37	12.05	0.00	0.26	3.53	7.91	11.70	1.48
060-070	8.3	16756	0.12	5.92	4.84	0.27	11.14	0.00	0.24	3.78	6.83	10.85	1.32
070-080	8.3	15408	0.10	4.72	3.40	0.20	8.41	0.00	0.22	2.73	5.22	8.17	1.49
080-090	8.2	11556	0.14	4.72	3.24	0.13	8.23	0.00	0.23	3.08	4.75	8.05	1.07

Cuadro C4. Concentración iónica en meq/100 g de suelo. Extracto de saturación.  
Cuenca del Oriental. Perfil 5, Laguna Totolcingo.

Profundidad	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma meq/100 g	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	Error %
000-010	8.4	32100	4.59	3.12	7.56	0.84	16.11	0.01	0.25	7.35	8.16	15.77	1.06
010-020	8.3	28890	3.10	2.33	6.13	0.72	12.28	0.00	0.22	4.62	7.15	11.99	1.20
020-030	7.9	26964	0.73	4.91	4.65	0.51	10.80	0.00	0.10	4.46	6.01	10.57	1.09
030-040	7.8	22277	0.76	4.03	4.13	0.39	9.31	0.00	0.10	3.80	5.21	9.11	1.08
040-050	7.9	21828	0.38	4.67	3.73	0.33	9.12	0.00	0.13	2.96	5.85	8.93	1.06
050-060	8.1	18939	0.32	2.95	3.18	0.24	6.70	0.00	0.13	2.50	3.92	6.55	1.07
060-070	8.1	19902	0.37	3.58	3.87	0.30	8.12	0.00	0.18	2.78	4.99	7.95	1.07
070-080	8.1	20608	0.37	3.32	4.42	0.35	8.46	0.00	0.18	2.91	5.20	8.28	1.08
080-090	8.1	23176	0.53	3.07	5.01	0.38	8.99	0.00	0.19	3.53	5.08	8.80	1.09
090-100	8.0	21828	0.52	4.29	7.18	0.52	12.52	0.00	0.16	4.64	7.44	12.24	1.11
100-110	7.9	19902	0.57	5.75	5.77	0.40	12.49	0.00	0.17	4.60	7.43	12.21	1.14
110-120	7.8	14188	0.57	3.55	4.41	0.30	8.83	0.00	0.16	3.31	5.17	8.63	1.15
120-130	8.0	16564	0.28	5.30	4.04	0.45	10.07	0.00	0.22	3.54	6.02	9.78	1.47

Cuadro C5. Concentración iónica en meq/100 g de suelo. Extracto de saturación.  
Cuenca del Oriental. Perfil 2, Laguna Tepeyahualco.

Profundidad	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	Error
							meq/100 g						%
000-010	8.2	829	0.01	0.16	0.25	0.05	0.48	0.00	0.10	0.32	0.05	0.47	1.02
010-020	8.3	2550	0.03	0.24	1.31	0.12	1.70	0.00	0.56	0.91	0.19	1.66	1.20
020-030	8.3	5063	0.02	0.15	2.53	0.18	2.88	0.00	0.20	1.96	0.66	2.82	1.09

Cuadro C6. Concentración iónica en meq/100 g de suelo. Extracto de saturación.  
Cuenca del Oriental. Perfil 6, Área de riego Laguna Tepeyahualco.

Profundidad	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	Error
							meq/100 g						%
000-010	7.9	1348	0.09	0.23	0.09	0.02	0.43	0.00	0.07	0.11	0.23	0.41	1.45
010-020	8.1	899	0.04	0.16	0.06	0.01	0.26	0.00	0.08	0.09	0.09	0.26	1.31
020-030	8.2	706	0.02	0.10	0.08	0.01	0.21	0.00	0.09	0.05	0.06	0.21	1.45
030-040	8.2	706	0.03	0.14	0.05	0.01	0.23	0.00	0.11	0.07	0.04	0.22	1.01
040-050	7.7	706	0.03	0.17	0.04	0.00	0.24	0.00	0.10	0.09	0.04	0.23	1.31
050-060	8.1	899	0.04	0.18	0.10	0.01	0.32	0.00	0.11	0.17	0.03	0.32	1.25
060-070	8.0	1220	0.04	0.18	0.20	0.01	0.43	0.00	0.09	0.19	0.14	0.41	1.22
070-080	8.1	1412	0.06	0.20	0.22	0.01	0.49	0.00	0.09	0.19	0.20	0.48	1.05
080-090	8.0	1541	0.05	0.24	0.21	0.01	0.50	0.00	0.08	0.23	0.18	0.49	1.06
090-100	7.9	1862	0.08	0.29	0.26	0.01	0.64	0.00	0.08	0.42	0.12	0.62	1.07
100-110	7.8	1669	0.13	0.26	0.26	0.00	0.66	0.00	0.09	0.41	0.14	0.65	1.07
110-120	7.9	1798	0.10	0.29	0.23	0.00	0.62	0.00	0.09	0.36	0.16	0.60	1.20
120-130	7.9	1541	0.06	0.27	0.18	0.00	0.52	0.00	0.09	0.32	0.10	0.51	1.09

Cuadro C7. Concentración iónica en meq/100 g de suelo. Extracto de saturación.  
Cuenca del Oriental. Punto 7, Sedimento lago cráter La Preciosa.

Profundidad	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	Error
							meq/100 g						%
000-030	8.4	5585	0.10	1.60	2.42	0.14	4.25	0.00	0.58	1.59	1.98	4.15	1.26

Cuadro C8. Concentración iónica en meq/100 g de suelo. Extracto de saturación.  
Cuenca del Oriental. Punto 8, Costra salina Laguna Totolcingo.

Profundidad	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	Error
							meq/100 g						%
Superficial	10	13482	0.01	0.08	9.38	0.53	10.00	0.38	1.13	5.20	3.08	9.78	1.09

Sales solubles en el extracto 1:5

Cuadro C9. Concentración iónica en meq/100 g de suelo. Relación 1:5. Cuenca del Oriental. Perfil 1, Laguna Totolcingo.

Profundidad	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma meq/100 g	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	Error %
000-010	7.0	570	0.65	1.50	0.59	0.08	2.82	0.00	1.38	0.65	0.73	2.76	1.05
010-020	7.2	439	0.45	1.45	0.26	0.02	2.17	0.00	1.11	0.40	0.62	2.12	1.07
020-030	7.1	353	0.25	1.10	0.37	0.03	1.75	0.00	1.02	0.35	0.34	1.70	1.23
030-040	7.2	294	0.20	0.90	0.34	0.02	1.46	0.00	0.95	0.25	0.23	1.43	1.04
040-050	7.1	226	0.35	0.65	0.07	0.05	1.12	0.00	0.76	0.25	0.08	1.09	1.16
050-060	7.0	200	0.10	0.60	0.22	0.07	0.99	0.00	0.62	0.30	0.06	0.97	0.95
060-070	7.1	203	0.15	0.55	0.23	0.08	1.01	0.00	0.68	0.25	0.06	0.99	0.94
070-080	7.0	305	0.20	0.95	0.25	0.11	1.51	0.00	1.01	0.30	0.17	1.47	1.21
080-090	7.0	407	0.25	1.15	0.50	0.11	2.00	0.00	1.11	0.45	0.39	1.95	1.17
090-100	7.2	407	0.20	1.41	0.24	0.17	2.02	0.00	1.24	0.35	0.37	1.96	1.49
100-110	7.2	393	0.20	0.95	0.63	0.17	1.95	0.00	1.20	0.35	0.34	1.89	1.50
110-120	7.3	409	0.20	1.20	0.42	0.20	2.02	0.00	1.27	0.35	0.37	1.98	0.98

Cuadro C10. Concentración iónica en meq/100 g de suelo. Relación 1:5. Cuenca del Oriental. Perfil 3, Laguna Totolcingo.

Profundidad	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma meq/100 g	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	Error %
000-010	9.8	7704	0.00	0.38	35.22	2.50	38.09	1.45	5.75	25.61	4.29	37.10	1.32
010-020	10.0	5136	0.00	0.50	23.20	1.71	25.40	1.10	3.50	16.02	4.15	24.76	1.27
020-030	10.0	3082	0.00	0.38	13.75	1.12	15.24	0.55	2.50	7.88	3.94	14.87	1.23
030-040	9.7	1348	0.00	0.75	5.55	0.38	6.67	0.20	1.13	4.75	0.45	6.53	1.10
040-050	9.2	719	0.00	0.25	3.13	0.18	3.56	0.08	1.00	2.00	0.41	3.48	1.07
050-060	8.9	487	0.00	0.38	1.90	0.14	2.41	0.07	0.61	1.26	0.43	2.36	1.05
060-070	8.9	325	0.13	0.38	1.05	0.06	1.61	0.05	0.46	0.59	0.48	1.57	1.10
070-080	8.6	313	0.00	0.50	1.00	0.06	1.55	0.04	0.45	0.66	0.37	1.52	1.14
080-090	8.8	696	0.00	0.50	2.81	0.14	3.44	0.04	0.63	1.43	1.28	3.37	1.03

Cuadro C11. Concentración iónica en meq/100 g de suelo. Relación 1:5. Cuenca del Oriental. Perfil 4, Laguna Totolcingo.

Profundidad	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma meq/100 g	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	Error %
000-010	8.7	1027	0.13	4.66	0.05	0.24	5.08	0.08	1.51	2.74	0.61	4.93	1.45
010-020	8.7	1284	0.13	4.37	1.45	0.41	6.35	0.08	1.47	2.25	2.38	6.17	1.40
020-030	8.6	1798	0.13	6.03	2.30	0.44	8.89	0.08	1.52	2.88	4.24	8.70	1.08
030-040	8.6	2311	0.13	7.36	3.45	0.50	11.43	0.08	1.51	4.13	5.48	11.19	1.06
040-050	8.6	2953	0.13	9.08	4.85	0.54	14.59	0.07	1.31	6.00	6.80	14.18	1.44
050-060	8.6	3852	0.13	12.24	6.15	0.53	19.04	0.06	1.19	8.25	8.98	18.48	1.48
060-070	8.6	3980	0.25	12.23	6.75	0.46	19.69	0.06	1.12	9.75	8.25	19.17	1.33
070-080	8.5	3210	0.13	10.07	5.30	0.38	15.87	0.05	0.99	8.00	6.36	15.40	1.49
080-090	8.3	2568	0.13	7.91	4.45	0.22	12.70	0.00	1.00	7.13	4.31	12.43	1.07

Cuadro C12. Concentración iónica en meq/100 g de suelo. Relación 1:5. Cuenca del Oriental. Perfil 5, Laguna Totolcingo.

Profundidad	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma meq/100 g	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	Error %
000-010	8.7	5650	0.13	16.43	10.20	1.19	27.94	0.15	1.50	16.13	9.58	27.35	1.07
010-020	8.5	3980	0.25	11.10	7.35	0.99	19.68	0.08	0.75	10.13	8.26	19.21	1.21
020-030	8.2	3659	0.13	10.73	6.40	0.84	18.10	0.00	0.63	9.25	7.83	17.71	1.09
030-040	8.3	3146	0.25	9.54	5.15	0.62	15.56	0.00	0.50	7.88	6.85	15.23	1.07
040-050	8.3	3082	0.25	9.51	4.95	0.53	15.24	0.00	0.50	7.63	6.80	14.92	1.06
050-060	8.2	2440	0.13	8.02	3.55	0.37	12.07	0.00	0.50	6.13	5.18	11.81	1.09
060-070	8.2	2696	0.25	8.30	4.30	0.48	13.33	0.00	0.50	5.88	6.68	13.05	1.06
070-080	8.2	2825	0.25	9.04	4.20	0.49	13.97	0.00	0.63	6.25	6.80	13.67	1.09
080-090	8.3	3403	0.25	11.11	4.95	0.52	16.82	0.00	0.75	7.75	7.96	16.46	1.08
090-100	8.3	4173	0.38	12.29	7.30	0.67	20.63	0.00	0.88	10.25	9.05	20.18	1.10
100-110	8.1	4879	0.38	14.76	8.30	0.68	24.11	0.00	0.75	12.88	9.95	23.57	1.13
110-120	8.2	3531	0.25	11.28	5.45	0.47	17.45	0.00	0.75	8.50	7.81	17.06	1.14
120-130	8.1	2953	0.13	9.77	4.30	0.40	14.59	0.00	0.75	6.88	6.55	14.17	1.46

Cuadro C13. Concentración iónica en meq/100 g de suelo. Relación 1:5. Cuenca del Oriental. Perfil 2, Laguna Tepeyahualco.

Profundidad	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma meq/100 g	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	Error %
000-010	8.6	674	0.00	0.50	2.37	0.46	3.33	0.45	2.30	0.40	0.11	3.26	1.10
010-020	8.8	1216	0.06	0.44	5.11	0.40	6.01	0.50	3.61	1.40	0.37	5.87	1.17
020-030	9.0	1478	0.11	0.39	6.35	0.47	7.31	1.00	3.48	2.00	0.68	7.15	1.10
030-040	9.0	1664	0.09	0.66	6.92	0.56	8.23	0.93	2.95	2.40	1.77	8.05	1.09
040-050	9.1	1632	0.05	0.45	6.92	0.66	8.07	1.25	2.57	2.25	1.83	7.90	1.07
050-060	9.1	1554	0.05	0.71	6.42	0.52	7.69	1.10	2.79	2.15	1.49	7.53	1.04
060-070	9.1	1535	0.02	0.74	6.35	0.50	7.59	1.00	3.09	2.05	1.29	7.43	1.07
070-080	9.1	1322	0.02	0.49	5.60	0.45	6.54	1.25	2.29	1.85	1.01	6.40	1.10
080-090	8.9	1283	0.04	0.22	5.67	0.43	6.35	1.11	2.20	1.95	0.96	6.21	1.10
090-100	8.5	1262	0.00	0.50	5.36	0.38	6.24	1.09	1.93	1.85	1.24	6.10	1.11
100-110	8.8	1709	0.00	0.75	7.17	0.53	8.45	0.83	5.57	0.60	1.27	8.26	1.13
110-120	8.9	1909	0.00	0.50	8.34	0.60	9.44	0.60	5.95	0.70	1.97	9.22	1.16
120-130	8.7	1956	0.00	0.50	8.56	0.61	9.67	0.55	6.59	0.70	1.55	9.39	1.46
130-140	8.7	2008	0.00	1.00	8.30	0.62	9.92	0.28	6.43	0.80	2.14	9.65	1.39
140-150	8.9	2090	0.00	0.75	8.91	0.68	10.34	0.28	7.11	0.85	1.89	10.12	1.08
150-160	8.7	1960	0.00	0.75	8.37	0.58	9.70	0.21	6.40	0.80	2.08	9.49	1.06
160-170	8.7	2232	0.00	0.50	9.85	0.68	11.03	0.18	7.65	0.95	1.94	10.72	1.42
170-180	8.6	1894	0.00	0.75	8.06	0.55	9.36	0.16	6.15	0.90	1.89	9.09	1.46
180-190	8.5	1868	0.00	0.75	7.94	0.55	9.24	0.13	6.17	0.85	1.86	9.00	1.31
190-200	8.2	1704	0.00	0.50	7.43	0.50	8.42	0.00	5.86	0.80	1.52	8.17	1.48
200-210	8.4	1692	0.00	1.00	6.87	0.50	8.37	0.00	5.54	0.80	1.86	8.19	1.05
210-220	8.3	1638	0.07	0.39	7.16	0.49	8.10	0.00	2.92	3.50	1.46	7.88	1.36
220-230	8.2	1490	0.03	0.22	6.66	0.46	7.37	0.00	2.81	3.20	1.18	7.19	1.26
230-240	8.3	1104	0.00	0.20	4.93	0.33	5.46	0.00	2.24	2.25	0.84	5.33	1.21
240-250	8.2	934	0.00	0.20	4.16	0.27	4.62	0.00	1.84	1.95	0.73	4.52	1.08
250-260	8.2	864	0.00	0.20	3.81	0.27	4.28	0.00	1.71	1.75	0.73	4.19	1.05
260-270	8.0	816	0.01	0.25	3.56	0.23	4.04	0.00	1.67	1.55	0.73	3.95	1.05
270-280	7.9	988	0.02	0.28	4.31	0.28	4.89	0.00	1.91	2.00	0.87	4.78	1.06
280-290	7.7	634	0.02	0.28	2.65	0.19	3.14	0.00	1.33	1.10	0.65	3.07	1.01
290-300	7.8	761	0.02	0.39	3.14	0.22	3.76	0.00	1.41	1.60	0.68	3.68	1.07

Cuadro C14. Concentración iónica en meq/100 g de suelo. Relación 1:5. Cuenca del Oriental. Perfil 6, Área de riego Laguna Tepeyahualco.

Profundidad	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma meq/100 g	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	Error %
000-010	8.3	162	0.13	0.38	0.23	0.06	0.80	0.00	0.30	0.38	0.11	0.78	1.29
010-020	8.3	128	0.13	0.21	0.25	0.05	0.63	0.00	0.26	0.25	0.11	0.62	1.03
020-030	8.3	128	0.13	0.18	0.28	0.04	0.63	0.00	0.22	0.25	0.14	0.61	1.47
030-040	8.3	128	0.13	0.17	0.29	0.05	0.63	0.00	0.21	0.24	0.18	0.62	0.80
040-050	8.2	128	0.13	0.18	0.29	0.03	0.63	0.00	0.27	0.17	0.18	0.62	1.18
050-060	8.3	139	0.13	0.14	0.40	0.03	0.69	0.00	0.26	0.30	0.11	0.67	1.47
060-070	8.2	174	0.13	0.13	0.57	0.03	0.86	0.00	0.28	0.32	0.25	0.84	1.12
070-080	8.3	186	0.13	0.17	0.59	0.04	0.92	0.00	0.28	0.42	0.21	0.90	1.23
080-090	8.3	186	0.25	0.10	0.53	0.04	0.92	0.00	0.26	0.42	0.23	0.90	0.98
090-100	8.3	220	0.13	0.33	0.60	0.03	1.09	0.00	0.26	0.41	0.40	1.07	1.19
100-110	8.2	220	0.13	0.35	0.60	0.02	1.09	0.00	0.26	0.41	0.40	1.07	1.18
110-120	8.3	197	0.25	0.19	0.53	0.01	0.98	0.00	0.22	0.42	0.32	0.96	1.06
120-130	8.2	197	0.13	0.30	0.54	0.01	0.98	0.00	0.22	0.38	0.36	0.96	1.10

Cuadro C15. Concentración iónica en meq/100 g de suelo. Relación 1:5. Cuenca del Oriental. Punto 7, Sedimento, lago cráter La Preciosa.

Profundidad	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma meq/100 g	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	Error %
000-030	8.4	1027	0.13	3.90	0.95	0.11	5.08	0.00	1.00	2.55	1.41	4.96	1.23

Cuadro C16. Concentración iónica en meq/100 g de suelo. Relación 1:5. Cuenca del Oriental. Punto 8, Costra salina Laguna Totolcingo.

Profundidad	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma meq/100 g	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	Error %
Superficial	10	3146	0.13	0.21	14.45	0.78	15.56	2.61	5.13	4.25	3.24	15.22	1.09

Base intercambiables

Cuadro C17. Bases intercambiables. Cuenca del Oriental. Perfil 1, Laguna Totolcingo.

Profundidad	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma
	meq/100 g					%				
000-010	2.63	5.63	0.44	0.21	8.91	30	63	5	2	100
010-020	2.64	10.03	0.28	0.20	13.15	20	76	2	2	100
020-030	2.68	8.46	0.28	0.24	11.68	23	72	2	2	100
030-040	2.10	6.74	0.19	0.29	9.31	23	72	2	3	100
040-050	1.73	5.16	0.15	0.36	7.39	23	70	2	5	100
050-060	1.74	3.00	0.11	0.39	5.24	33	57	2	7	100
060-070	1.93	3.01	0.11	0.33	5.38	36	56	2	6	100
070-080	1.93	4.55	0.21	0.41	7.10	27	64	3	6	100
080-090	1.86	8.55	0.26	0.46	11.13	17	77	2	4	100
090-100	1.90	9.81	0.27	0.50	12.48	15	79	2	4	100
100-110	2.12	7.68	0.26	0.54	10.59	20	72	2	5	100
110-120	1.91	7.86	0.27	0.55	10.59	18	74	3	5	100

Cuadro C18. Bases intercambiables. Cuenca del Oriental. Perfil 3, Laguna Totolcingo.

Profundidad	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma
	meq/100 g					%				
000-010	0.19	0.13	54.60	5.52	60.43	0	0	90	9	100
010-020	0.17	0.13	36.42	3.17	39.89	0	0	91	8	100
020-030	0.40	0.36	25.59	3.06	29.42	1	1	87	10	100
030-040	0.38	2.17	14.33	2.49	19.37	2	11	74	13	100
040-050	0.37	5.47	8.57	2.21	16.62	2	33	52	13	100
050-060	0.77	5.15	0.72	1.03	7.67	10	67	9	13	100
060-070	0.97	4.06	1.08	0.51	6.63	15	61	16	8	100
070-080	1.37	6.25	1.32	0.51	9.44	15	66	14	5	100
080-090	0.77	6.17	3.01	1.22	11.17	7	55	27	11	100

Cuadro C19. Bases intercambiables. Cuenca del Oriental. Perfil 4, Laguna Totolcingo.

Profundidad	meq/100 g				Suma	%				Suma
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	
000-010	0.17	10.16	0.50	0.80	11.63	1	87	4	7	100
010-020	0.16	8.24	0.74	0.61	9.74	2	85	8	6	100
020-030	0.34	7.73	0.08	0.69	8.84	4	87	1	8	100
030-040	0.35	9.97	0.67	0.65	11.64	3	86	6	6	100
040-050	0.53	12.19	0.09	0.48	13.30	4	92	1	4	100
050-060	0.46	11.86	4.39	0.87	17.59	3	67	25	5	100
060-070	0.48	12.08	3.76	0.75	17.08	3	71	22	4	100
070-080	0.30	13.08	2.60	0.50	16.49	2	79	16	3	100
080-090	0.26	10.68	0.44	0.29	11.67	2	92	4	3	100

Cuadro C20. Bases intercambiables. Cuenca del Oriental. Perfil 5, Laguna Totolcingo.

Profundidad	meq/100 g				Suma	%				Suma
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	
000-010	0.00	18.28	1.24	0.30	19.82	0	92	6	1	100
010-020	0.00	14.87	0.00	0.36	15.23	0	98	0	2	100
020-030	0.00	13.29	0.15	0.45	13.89	0	96	1	3	100
030-040	0.00	7.57	0.00	0.31	7.88	0	96	0	4	100
040-050	0.02	6.93	0.00	0.23	7.17	0	97	0	3	100
050-060	0.08	6.45	0.00	0.24	6.77	1	95	0	4	100
060-070	0.00	9.82	0.00	0.32	10.14	0	97	0	3	100
070-080	0.23	8.08	0.00	0.25	8.56	3	94	0	3	100
080-090	0.00	11.53	0.00	0.24	11.77	0	98	0	2	100
090-100	0.08	17.51	0.00	0.24	17.82	0	98	0	1	100
100-110	0.00	14.45	0.23	0.38	15.06	0	96	2	3	100
110-120	0.00	19.45	0.59	0.50	20.53	0	95	3	2	100
120-130	0.00	18.70	0.00	0.57	19.27	0	97	0	3	100

Cuadro C21. Bases intercambiables, 1:5-CIC. Cuenca del Oriental. Perfil 2, Laguna Tepayahualco.

Profundidad	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma
	meq/100 g					%				
000-010	4.20	1.10	21.03	4.42	30.75	14	4	68	14	100
010-020	0.94	0.16	34.89	5.14	41.13	2	0	85	12	100
020-030	0.69	0.00	32.66	4.48	37.82	2	0	86	12	100
030-040	1.11	0.00	28.08	4.27	33.46	3	0	84	13	100
040-050	1.35	0.00	22.29	3.73	27.36	5	0	81	14	100
050-060	1.16	0.00	23.78	4.17	29.10	4	0	82	14	100
060-070	1.19	0.00	16.86	3.49	21.53	6	0	78	16	100
070-080	0.79	0.52	12.81	3.30	17.40	5	3	74	19	100
080-090	1.17	0.19	14.53	3.74	19.62	6	1	74	19	100
090-100	1.00	0.00	14.65	2.78	18.43	5	0	79	15	100
100-110	0.80	0.00	33.23	3.22	37.25	2	0	89	9	100
110-120	0.60	0.30	39.67	3.64	44.21	1	1	90	8	100
120-130	0.60	0.30	34.44	3.28	38.62	2	1	89	8	100
130-140	0.80	0.00	33.30	2.88	36.98	2	0	90	8	100
140-150	0.80	0.25	36.10	3.28	40.43	2	1	89	8	100
150-160	0.80	0.05	39.43	3.79	44.07	2	0	89	9	100
160-170	0.80	1.50	33.36	2.82	38.48	2	4	87	7	100
170-180	0.80	0.85	42.34	4.05	48.04	2	2	88	8	100
180-190	1.00	0.65	42.26	4.30	48.21	2	1	88	9	100
190-200	1.00	1.50	31.38	3.31	37.18	3	4	84	9	100
200-210	1.40	1.40	35.14	4.10	42.04	3	3	84	10	100
210-220	2.14	3.62	30.04	4.33	40.12	5	9	75	11	100
220-230	1.77	4.58	23.14	4.30	33.79	5	14	68	13	100
230-240	1.80	3.80	8.67	2.95	17.22	10	22	50	17	100
240-250	2.20	3.80	3.45	2.28	11.72	19	32	29	19	100
250-260	2.40	5.80	4.20	2.23	14.63	16	40	29	15	100
260-270	3.00	6.76	5.24	2.52	17.51	17	39	30	14	100
270-280	2.58	6.12	8.10	2.44	19.24	13	32	42	13	100
280-290	2.38	6.52	2.76	1.91	13.57	18	48	20	14	100
290-300	2.99	9.22	3.06	1.82	17.08	17	54	18	11	100

Cuadro C22. Bases intercambiables. Cuenca del Oriental. Perfil 6, Área de riego Laguna Tepayahualco.

Profundidad	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma
	meq/100 g					%				
000-010	3.31	3.97	0.35	0.56	8.20	40	48	4	7	100
010-020	4.16	4.04	0.49	0.57	9.27	45	44	5	6	100
020-030	3.78	4.10	0.52	0.53	8.92	42	46	6	6	100
030-040	3.57	4.26	0.54	0.51	8.89	40	48	6	6	100
040-050	4.37	4.83	0.59	0.42	10.21	43	47	6	4	100
050-060	3.96	4.22	0.70	0.35	9.24	43	46	8	4	100
060-070	4.76	4.82	0.97	0.37	10.93	44	44	9	3	100
070-080	4.94	4.20	0.96	0.37	10.47	47	40	9	4	100
080-090	4.35	4.16	0.80	0.33	9.65	45	43	8	3	100
090-100	5.52	3.91	0.89	0.31	10.63	52	37	8	3	100
100-110	5.67	4.14	0.97	0.20	10.97	52	38	9	2	100
110-120	5.10	4.11	0.84	0.18	10.22	50	40	8	2	100
120-130	5.14	3.73	0.98	0.16	10.01	51	37	10	2	100

Contenido de humedad, carbonato de calcio equivalente, densidad aparente y densidad real

Anexo C23. Contenido de humedad y carbonato de calcio equivalente de los perfiles de suelo de la Cuenca del Oriental.

Profundidad	Humedad						Carbonato de calcio equivalente					
	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
000-010	19.87	6.15	21.92	29.58	30.89	8.40	8.53	5.97	3.45	11.21	13.79	5.52
010-020	27.53	16.22	35.82	31.49	30.53	12.65	9.77	4.03	6.90	19.31	7.93	4.83
020-030	29.95	20.86	33.89	37.87	29.47	13.54	11.01	4.26	8.97	25.86	3.97	5.00
030-040	23.02	17.76	28.91	42.63	27.02	13.66	13.64	11.78	7.41	29.31	4.66	5.17
040-050	17.83	24.76	30.80	46.31	26.65	15.43	18.60	12.09	6.90	31.90	5.34	5.34
050-060	14.98	17.12	29.06	67.01	21.85	17.54	26.36	10.23	6.03	41.38	10.34	6.72
060-070	16.13	14.44	31.68	90.23	27.79	21.93	27.13	7.75	8.79	43.97	9.83	7.07
070-080	28.49	13.09	37.70	98.09	32.16	21.17	34.11	7.91	14.14	37.07	13.45	7.07
080-090	42.65	15.13	39.63	101.36	37.42	21.21	41.86	5.74	10.86	34.48	16.03	6.90
090-100	39.71	20.33			50.56	28.36	51.16	10.54			22.41	7.07
100-110	34.89	35.80			57.35	27.12	55.04	22.48			23.28	7.76
110-120	39.95	44.08			58.47	21.38	55.81	25.58			22.41	7.24
120-130		37.61			56.89	24.45		24.81			18.97	7.76
130-140		49.25						27.13				
140-150		49.42						22.48				
150-160		48.09						24.81				
160-170		51.77						26.36				
170-180		50.90						24.81				
180-190		25.25						24.03				
190-200		53.12						21.71				
200-210		52.56						20.16				
210-220		48.83						20.16				
220-230		46.18						16.28				
230-240		29.96						8.53				
240-250		24.84						8.06				
250-260		24.62						9.15				
260-270		32.92						14.73				
270-280		41.62						23.26				
280-290		24.18						19.38				
290-300		42.58						29.46				

Anexo C24. Densidad aparente y densidad real de los perfiles de suelo de la Cuenca del Oriental.

Profundidad	Densidad aparente						Densidad real					
	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
000-010	0.985	0.956	1.250	0.893	1.190	1.471	2.419	2.096	2.691	2.368	2.583	2.490
010-020	0.989	0.979	1.087	0.962	1.316	1.471	2.356	2.150	2.606	2.747	2.761	2.545
020-030	0.991	0.980	1.136	0.926	1.316	1.471	2.459	2.171	2.688	2.504	2.580	2.572
030-040	0.990	0.983	1.136	0.833	1.316	1.389	2.332	2.000	2.585	2.459	2.599	2.594
040-050	0.992	0.983	1.190	0.833	1.316	1.389	2.248	2.078	2.594	2.367	2.535	2.566
050-060	0.993	0.985	1.389	0.758	1.316	1.389	2.282	2.079	2.537	2.394	2.527	2.552
060-070	0.994	0.984	1.250	0.735	1.190	1.389	2.187	2.160	2.512	2.521	2.549	2.530
070-080	0.993	0.983	1.250	0.758	1.136	1.389	2.290	2.122	2.430	2.376	2.467	2.604
080-090	0.993	0.981	1.250	0.806	1.190	1.471	2.426	1.799	2.599	2.483	2.417	2.611
090-100	0.991	0.986			1.136	1.389	2.524	2.067			2.615	2.670
100-110	0.992	0.988			1.136	1.389	2.561	1.876			2.729	2.626
110-120	0.993	0.989			1.136	1.471	2.607	2.001			2.626	2.626
120-130		0.987			1.000	1.471		1.961			2.648	2.648
130-140		0.989						1.946				
140-150		0.991						1.969				
150-160		0.992						2.023				
160-170		0.991						2.312				
170-180		0.990						1.994				
180-190		0.989						2.090				
190-200		0.990						1.996				
200-210		0.992						1.986				
210-220		0.992						2.154				
220-230		0.991						2.063				
230-240		0.992						2.351				
240-250		0.992						2.281				
250-260		0.991						2.309				
260-270		0.991						2.355				
270-280		0.993						2.411				
280-290		0.991						2.315				
290-300		0.994						2.367				

## Anexo D. Sierra Norte

Cuadro D1. Identificación de los puntos de toma de muestras de agua en la Sierra Norte, estado de Puebla.

Estación	Nombre	Posición		Elevación m
		N	S	
47	Nacimiento en Ejido Gómez Tepetenco	19° 45.358'	097° 29.546'	2616
48	Río en Tlautitlaltepa	25° 48.300'	100° 40.033'	2576
49	Río Texpilco en puente Zacapoaxtla	19° 52.671'	097° 35.039'	1725
50	Río Apulco en Cascada La Gloria	19° 54.412'	097° 37.003'	1734
51	Río Cuetzalan en Nauzontla	19° 57.062'	097° 36.404'	1434
52	Río Tepeacan en San Miguel	19° 58.698'	097° 39.412'	598
53	Río Escorial en Zapotitlán	19° 59.894'	097° 42.434'	696
54	Río Escorial en puente a Zacapoaxtla	20° 00.094'	097° 43.560'	710
55	Río San Pedro en Ahuacatlán	20° 00.589'	097° 50.342'	1278
56	Río Ajajalpa en puente Km 92	20° 01.780'	097° 53.468'	1248
57	Nacimiento termal El Pinal en Jicolapan	19° 59.136'	097° 59.956'	2232
58	Río Agrio en Cascada San Pedro	19° 54.859'	097° 57.407'	2048
59	Cascada Quetzalapan en Ejido Tuliman	19° 52.418'	097° 58.576'	2166
60	Nacimiento Agua Mineral en Ejido Tuliman	19° 52.040'	097° 58.575'	1905
61	Río Agua Mineral en Ejido Tuliman	19° 52.040'	097° 58.575'	1905
62	Nacimiento termal Barranca Chignahuapan	19° 50.316'	097° 59.590'	2170
63	Río Ajajalpa en Barranca Chignahuapan	19° 50.316'	097° 59.590'	2170
64	Manantial en Chignahuapan	19° 50.355'	098° 01.277'	2273
65	Nacimiento en entronque a Pueblo Nuevo	19° 58.483'	098° 04.271'	2572
66	Jagüey en Pueblo Nuevo	19° 57.308'	098° 06.368'	2613
67	Los Azufres 1 en Pueblo Nuevo	19° 56.235'	098° 08.541'	2839
68	Los Azufres 2 en Pueblo Nuevo	19° 56.235'	098° 08.541'	2839
69	Los Azufres 3 en Pueblo Nuevo	19° 56.235'	098° 08.541'	2839
70	Los Azufres 4 en Pueblo Nuevo	19° 56.288'	098° 08.587'	2842
71	Los Azufres 5 en Pueblo Nuevo	19° 56.190'	098° 08.586'	2841
72	Manantial en Puente Atotonilco	20° 00.576'	098° 07.616'	2224
73	Río Agrio en Puente Atotonilco	20° 00.576'	098° 07.616'	2224
74	Presa Tejojotal	20° 08.367'	098° 08.925'	2142

Cuadro D2. Concentración iónica de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla.  
Primavera 2008.

No.	Estación	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup> mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma cationes	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma aniones	Suma mg L <sup>-1</sup> /mmol L <sup>-1</sup>	Error %	STD mg L <sup>-1</sup>
1	47	8.7	83	0.12	0.18	0.44	0.08	0.82	0.02	0.57	0.15	0.05	0.79		1.86	
				2.40	2.19	10.12	3.13		0.60	34.77	5.32	2.40		60.93	63.37	
				0.06	0.09	0.44	0.08		0.01	0.57	0.15	0.03		1.43		
2	48	8.6	129	0.18	0.24	0.75	0.10	1.27	0.04	0.81	0.26	0.12	1.23		1.60	
				3.61	2.92	17.25	3.91		1.20	49.41	9.22	5.76		93.27	97.00	
				0.09	0.12	0.75	0.10		0.02	0.81	0.26	0.06		2.21		
3	54	8.1	186	0.48	0.50	0.67	0.16	1.81	0.00	1.21	0.40	0.18	1.79		0.56	
				9.62	6.08	15.41	6.26		0.00	73.81	14.18	8.65		134.00	139.36	
				0.24	0.25	0.67	0.16		0.00	1.21	0.40	0.09		3.02		
4	56	8.0	256	0.58	0.65	1.10	0.20	2.53	0.00	1.93	0.40	0.12	2.45		1.61	
				11.62	7.90	25.30	7.82		0.00	117.73	14.18	5.76		190.31	196.98	
				0.29	0.33	1.10	0.20		0.00	1.93	0.40	0.06		4.31		
5	57	7.3	897	2.40	2.60	3.57	0.29	8.86	0.00	5.61	2.60	0.39	8.60		1.49	
				48.10	31.59	82.11	11.34		0.00	342.21	92.17	18.73		626.25	645.03	
				1.20	1.30	3.57	0.29		0.00	5.61	2.60	0.20		14.77		
6	58	8.0	132	0.24	0.30	0.72	0.04	1.30	0.00	0.67	0.48	0.12	1.27		1.17	
				4.81	3.65	16.56	1.56		0.00	40.87	17.02	5.76		90.23	93.84	
				0.12	0.15	0.72	0.04		0.00	0.67	0.48	0.06		2.24		
7	59	8.9	161	0.20	0.26	1.04	0.08	1.58	0.06	1.01	0.35	0.12	1.54		1.28	
				4.01	3.16	23.92	3.13		1.80	61.61	12.41	5.76		115.80	120.43	
				0.10	0.13	1.04	0.08		0.03	1.01	0.35	0.06		2.80		
8	60	7.8	1332	2.50	3.05	7.18	0.42	13.15	0.00	7.84	4.62	0.35	12.81		1.31	
				50.10	37.06	165.14	16.42		0.00	478.24	163.78	16.81		927.55	950.74	
				1.25	1.53	7.18	0.42		0.00	7.84	4.62	0.18		23.01		
9	61	8.1	672	1.80	1.90	2.75	0.19	6.64	0.00	3.97	2.10	0.40	6.47		1.30	
				36.07	23.09	63.25	7.43		0.00	242.17	74.45	19.21		465.66	479.63	
				0.90	0.95	2.75	0.19		0.00	3.97	2.10	0.20		11.06		
10	62	7.5	1343	6.90	1.10	4.94	0.32	13.26	0.00	8.84	3.50	0.58	12.92		1.30	
				138.28	13.37	113.62	12.51		0.00	539.24	124.08	27.86		968.95	1002.86	
				3.45	0.55	4.94	0.32		0.00	8.84	3.50	0.29		21.89		
11	63	8.8	169	0.18	0.23	1.21	0.05	1.67	0.04	1.13	0.32	0.14	1.63		1.21	
				3.61	2.79	27.83	1.96		1.20	68.93	11.34	6.72		124.38	129.36	
				0.09	0.12	1.21	0.05		0.02	1.13	0.32	0.07		3.01		
12	64	9.3	149	0.25	0.32	0.84	0.06	1.47	0.02	0.98	0.28	0.15	1.43		1.38	
				5.01	3.89	19.32	2.35		0.60	59.78	9.93	7.20		108.07	112.40	
				0.13	0.16	0.84	0.06		0.01	0.98	0.28	0.08		2.53		
13	65	8.8	61	0.12	0.18	0.22	0.08	0.60	0.02	0.33	0.15	0.08	0.58		1.69	
				2.40	2.19	5.06	3.13		0.60	20.13	5.32	3.84		42.67	44.38	
				0.06	0.09	0.22	0.08		0.01	0.33	0.15	0.04		0.98		
14	66	6.7	107	0.20	0.32	0.37	0.17	1.06	0.00	0.65	0.25	0.12	1.02		1.92	
				4.01	3.89	8.51	6.65		0.00	39.65	8.86	5.76		77.33	80.42	
				0.10	0.16	0.37	0.17		0.00	0.65	0.25	0.06		1.76		
15	67	2.5	694	0.52	0.64	4.79	0.90	6.85	0.00	0.00	0.85	5.79	6.64		1.56	
				10.42	7.78	110.17	35.19		0.00	0.00	30.13	278.09		471.78	485.94	
				0.26	0.32	4.79	0.90		0.00	0.00	0.85	2.90		10.02		
16	68	3.5	464	0.48	0.56	2.92	0.62	4.58	0.00	0.00	0.70	3.76	4.46		1.33	
				9.62	6.80	67.16	24.24		0.00	0.00	24.82	180.59		313.23	324.20	
				0.24	0.28	2.92	0.62		0.00	0.00	0.70	1.88		6.64		
17	69	3.6	579	0.76	0.92	3.44	0.60	5.72	0.00	0.08	0.65	4.81	5.54		1.60	
				15.23	11.18	79.12	23.46		0.00	4.88	23.04	231.02		387.94	399.57	
				0.38	0.46	3.44	0.60		0.00	0.08	0.65	2.41		8.02		
18	72	9.4	77	0.18	0.20	0.29	0.09	0.76	0.02	0.49	0.20	0.03	0.74		1.33	
				3.61	2.43	6.67	3.52		0.60	29.89	7.09	1.44		55.25	57.46	
				0.09	0.10	0.29	0.09		0.01	0.49	0.20	0.02		1.29		
19	73	8.3	156	0.38	0.45	0.62	0.09	1.54	0.00	1.05	0.38	0.07	1.50		1.32	
				7.62	5.47	14.26	3.52		0.00	64.05	13.47	3.36		111.74	116.21	
				0.19	0.23	0.62	0.09		0.00	1.05	0.38	0.04		2.59		
20	74	8.2	82	0.20	0.25	0.34	0.02	0.81	0.00	0.45	0.30	0.04	0.79		1.25	
				4.01	3.04	7.82	0.78		0.00	27.45	10.64	1.92		55.65	57.88	
				0.10	0.13	0.34	0.02		0.00	0.45	0.30	0.02		1.36		

Cuadro D3. Concentración iónica de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla.  
Otoño 2008.

No.	Estación	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup> mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma cationes	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma aniones	Suma mg L <sup>-1</sup> /mmol L <sup>-1</sup>	Error %	STD mg L <sup>-1</sup>
21	49	7.0	321	2.04	0.56	0.42	0.08	3.10	0.00	1.75	0.80	0.62	3.17	225.36	1.12	233.25
				40.88	6.80	9.66	3.13		0.00	106.75	28.36	29.78		4.66		
				1.02	0.28	0.42	0.08		0.00	1.75	0.80	0.31				
22	50	7.7	221	1.67	0.32	0.15	0.04	2.18	0.00	1.10	0.62	0.40	2.12	150.66	1.40	155.93
				33.47	3.89	3.45	1.56		0.00	67.10	21.98	19.21		3.11		
				0.84	0.16	0.15	0.04		0.00	1.10	0.62	0.20				
23	51	7.8	263	2.08	0.24	0.22	0.06	2.60	0.00	1.12	0.55	0.86	2.53	181.13	1.36	187.47
				41.68	2.92	5.06	2.35		0.00	68.32	19.50	41.31		3.54		
				1.04	0.12	0.22	0.06		0.00	1.12	0.55	0.43				
24	52	7.7	121	0.77	0.21	0.18	0.04	1.20	0.00	0.57	0.55	0.05	1.17	80.36	1.27	83.57
				15.43	2.55	4.14	1.56		0.00	34.77	19.50	2.40		1.86		
				0.39	0.11	0.18	0.04		0.00	0.57	0.55	0.03				
25	53	7.3	89	0.41	0.25	0.19	0.03	0.88	0.00	0.55	0.25	0.06	0.86	62.09	1.15	64.57
				8.22	3.04	4.37	1.17		0.00	33.55	8.86	2.88		1.38		
				0.21	0.13	0.19	0.03		0.00	0.55	0.25	0.03				
26	54	8.1	288	1.91	0.35	0.52	0.06	2.84	0.00	1.88	0.75	0.12	2.75	203.87	1.61	211.00
				38.28	4.25	11.96	2.35		0.00	114.68	26.59	5.76		4.40		
				0.96	0.18	0.52	0.06		0.00	1.88	0.75	0.06				
27	55	8.0	354	2.76	0.38	0.24	0.12	3.50	0.00	2.28	0.92	0.22	3.42	252.40	1.16	261.23
				55.31	4.62	5.52	4.69		0.00	139.08	32.61	10.57		5.24		
				1.38	0.19	0.24	0.12		0.00	2.28	0.92	0.11				
28	56	8.0	295	1.65	0.72	0.46	0.08	2.91	0.00	1.96	0.70	0.17	2.83	208.06	1.39	215.34
				33.07	8.75	10.58	3.13		0.00	119.56	24.82	8.17		4.47		
				0.83	0.36	0.46	0.08		0.00	1.96	0.70	0.09				
29	57	6.1	1261	7.70	3.25	1.15	0.35	12.45	0.00	6.53	3.92	1.68	12.13	851.91	1.30	873.21
				154.31	39.49	26.45	13.69		0.00	398.33	138.96	80.69		18.27		
				3.85	1.63	1.15	0.35		0.00	6.53	3.92	0.84				
30	58	7.2	134	0.51	0.41	0.32	0.08	1.32	0.00	0.66	0.44	0.18	1.28	90.19	1.54	93.80
				10.22	4.98	7.36	3.13		0.00	40.26	15.60	8.65		2.05		
				0.26	0.21	0.32	0.08		0.00	0.66	0.44	0.09				
31	59	6.9	245	0.57	1.02	0.68	0.15	2.42	0.00	1.52	0.61	0.23	2.36	170.71	1.26	176.69
				11.42	12.39	15.64	5.87		0.00	92.72	21.62	11.05		3.87		
				0.29	0.51	0.68	0.15		0.00	1.52	0.61	0.12				
32	60	6.4	1913	7.71	6.00	4.76	0.42	18.89	0.00	9.77	8.30	0.33	18.40	1259.37	1.31	1290.85
				154.51	72.90	109.48	16.42		0.00	595.97	294.24	15.85		30.27		
				3.86	3.00	4.76	0.42		0.00	9.77	8.30	0.17				
33	61	7.0	243	0.93	0.75	0.61	0.11	2.40	0.00	1.30	0.85	0.19	2.34	164.64	1.27	170.40
				18.64	9.11	14.03	4.30		0.00	79.30	30.13	9.13		3.81		
				0.47	0.38	0.61	0.11		0.00	1.30	0.85	0.10				
34	63	6.7	108	0.35	0.40	0.26	0.06	1.07	0.00	0.60	0.30	0.14	1.04	74.16	1.42	77.13
				7.01	4.86	5.98	2.35		0.00	36.60	10.64	6.72		1.67		
				0.18	0.20	0.26	0.06		0.00	0.60	0.30	0.07				
35	64	6.6	238	0.94	0.87	0.46	0.08	2.35	0.00	1.25	0.75	0.29	2.29	159.88	1.29	165.48
				18.84	10.57	10.58	3.13		0.00	76.25	26.59	13.93		3.59		
				0.47	0.44	0.46	0.08		0.00	1.25	0.75	0.15				
36	65	6.7	119	0.58	0.30	0.23	0.04	1.15	0.00	0.65	0.37	0.16	1.18	82.57	1.29	85.88
				11.62	3.65	5.29	1.56		0.00	39.65	13.12	7.68		1.81		
				0.29	0.15	0.23	0.04		0.00	0.65	0.37	0.08				
37	66	6.4	104	0.41	0.25	0.29	0.08	1.03	0.00	0.63	0.28	0.08	0.99	73.25	1.98	76.18
				8.22	3.04	6.67	3.13		0.00	38.43	9.93	3.84		1.65		
				0.21	0.13	0.29	0.08		0.00	0.63	0.28	0.04				
38	67	5.5	212	1.24	0.35	0.42	0.08	2.09	0.00	0.60	0.52	0.90	2.02	140.15	1.70	145.06
				24.85	4.25	9.66	3.13		0.00	36.60	18.43	43.23		2.87		
				0.62	0.18	0.42	0.08		0.00	0.60	0.52	0.45				
39	68	3.0	691	2.25	1.82	2.58	0.17	6.82	0.00	0.00	2.76	3.88	6.64	417.39	1.34	429.91
				45.09	22.11	59.34	6.65		0.00	0.00	97.84	186.36		9.49		
				1.13	0.91	2.58	0.17		0.00	0.00	2.76	1.94				
40	69	3.6	469	2.56	0.71	1.16	0.20	4.63	0.00	0.00	1.84	2.67	4.51	287.90	1.31	297.97
				51.30	8.63	26.68	7.82		0.00	0.00	65.23	128.24		6.17		
				1.28	0.36	1.16	0.20		0.00	0.00	1.84	1.34				
41	70	2.9	714	2.48	2.14	2.07	0.36	7.05	0.00	0.00	4.50	2.39	6.89	411.70	1.15	424.05
				49.70	26.00	47.61	14.08		0.00	0.00	159.53	114.79		10.44		
				1.24	1.07	2.07	0.36		0.00	0.00	4.50	1.20				
42	71	5.1	101	0.40	0.25	0.28	0.06	0.99	0.00	0.38	0.32	0.26	0.96	66.85	1.54	69.53
				8.02	3.04	6.44	2.35		0.00	23.18	11.34	12.49		1.50		
				0.20	0.13	0.28	0.06		0.00	0.38	0.32	0.13				
43	73	7.3	116	0.37	0.36	0.32	0.10	1.15	0.00	0.58	0.38	0.16	1.12	79.59	1.32	82.78
				7.41	4.37	7.36	3.91		0.00	35.38	13.47	7.68		1.83		
				0.19	0.18	0.32	0.10		0.00	0.58	0.38	0.08				
44	74	7.9	65	0.29	0.19	0.11	0.05	0.64	0.00	0.36	0.24	0.02	0.62	44.03	1.59	45.80
				5.81	2.31	2.53	1.96		0.00	21.96	8.51	0.96		1.01		
				0.15	0.10	0.11	0.05		0.00	0.36	0.24	0.01				

Cuadro D4. Valores de pHc calculados de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla.

Muestreo	No.	Estación	$pK_2' - pK_c'$	pCa+Mg	pAlk	pHc
Primavera	1	47	2.11972	3.82391	3.22915	9.2
	2	48	2.13457	3.67778	3.07058	8.9
	3	54	2.14857	3.30980	2.91721	8.4
	4	56	2.16541	3.21112	2.71444	8.1
	5	57	2.25874	2.60206	2.25104	7.1
	6	58	2.13737	3.56864	3.17393	8.9
	7	59	2.14443	3.63827	2.97062	8.8
	8	60	2.29767	2.55674	2.10568	7.0
	9	61	2.23396	2.73283	2.40121	7.4
	10	62	2.29939	2.39794	2.05355	6.8
	11	63	2.14776	3.68825	2.93181	8.8
	12	64	2.14184	3.54516	3.00000	8.7
	13	65	2.11085	3.82391	3.45593	9.4
	14	66	2.12522	3.58503	3.18709	8.9
	15	67	2.22740	3.23657	0.00000	5.5
	16	68	2.19736	3.28400	0.00000	5.5
	17	69	2.21573	3.07572	4.09691	9.4
	18	72	2.11701	3.72125	3.29243	9.1
	19	73	2.14300	3.38195	2.97881	8.5
	20	74	2.12159	3.64782	3.34679	9.1
Otoño	21	49	2.18007	2.88606	2.75696	7.8
	22	50	2.16098	3.00218	2.95861	8.1
	23	51	2.17009	2.93554	2.95078	8.1
	24	52	2.13425	3.30980	3.24413	8.7
	25	53	2.12379	3.48149	3.25964	8.9
	26	54	2.17519	2.94692	2.72584	7.8
	27	55	2.18700	2.80410	2.64207	7.6
	28	56	2.17623	2.92628	2.70774	7.8
	29	57	2.29238	2.26162	2.18509	6.7
	30	58	2.13676	3.33724	3.18046	8.7
	31	59	2.16403	3.09963	2.81816	8.1
	32	60	2.33910	2.16399	2.01011	6.5
	33	61	2.16449	3.07572	2.88606	8.1
	34	63	2.12936	3.42597	3.22185	8.8
	35	64	2.16403	3.04335	2.90309	8.1
	36	65	2.13265	3.35655	3.18709	8.7
	37	66	2.12731	3.48149	3.20066	8.8
	38	67	2.15784	3.09963	3.22185	8.5
	39	68	2.23650	2.69144	0.00000	4.9
	40	69	2.20514	2.78648	0.00000	5.0
	41	70	2.23700	2.63639	0.00000	4.9
	42	71	2.12662	3.48812	3.42022	9.0
	43	73	2.13069	3.43771	3.23657	8.8
	44	74	2.11379	3.61979	3.44370	9.2

Cuadro D5. Valores del PSI con base en las distintas formulaciones de la RAS y en los valores de K de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla.

Muestreo	No.	Estación	RAS	PSI			RASaj	PSI			RAS°	PSI		
				0.01000	0.01152	0.01690		0.01000	0.01152	0.01690		0.01000	0.01152	0.01690
Primavera	1	47	1.14	1.12	1.29	1.88	0.26	0.26	0.30	0.43	0.68	0.68	0.78	1.14
	2	48	1.64	1.61	1.85	2.69	0.85	0.84	0.97	1.41	1.12	1.11	1.27	1.85
	3	54	0.96	0.95	1.09	1.59	0.98	0.97	1.12	1.63	0.77	0.77	0.88	1.29
	4	56	1.40	1.38	1.59	2.32	1.84	1.80	2.07	3.01	1.28	1.27	1.46	2.12
	5	57	2.26	2.21	2.54	3.68	5.17	4.91	5.62	8.03	2.59	2.52	2.89	4.19
	6	58	1.39	1.37	1.57	2.29	0.72	0.72	0.82	1.20	0.95	0.94	1.08	1.58
	7	59	2.17	2.12	2.44	3.54	1.40	1.38	1.59	2.32	1.56	1.54	1.76	2.57
	8	60	4.31	4.13	4.73	6.79	10.52	9.52	10.81	15.09	5.02	4.78	5.47	7.82
	9	61	2.02	1.98	2.28	3.30	4.11	3.95	4.52	6.49	2.22	2.17	2.49	3.62
	10	62	2.47	2.41	2.77	4.01	6.54	6.14	7.01	9.96	4.06	3.90	4.47	6.42
	11	63	2.67	2.60	2.99	4.32	1.69	1.66	1.91	2.78	2.00	1.96	2.26	3.27
	12	64	1.57	1.55	1.78	2.59	1.12	1.11	1.28	1.86	1.16	1.15	1.32	1.92
	13	65	0.57	0.56	0.65	0.95	0.01	0.01	0.01	0.01	0.31	0.31	0.35	0.52
	14	66	0.73	0.72	0.83	1.21	0.36	0.36	0.42	0.61	0.50	0.50	0.57	0.84
	15	67	6.29	5.92	6.76	9.61	24.76	19.84	22.19	29.50	8.47	7.81	8.89	12.52
	16	68	4.05	3.89	4.46	6.40	15.87	13.69	15.46	21.15	5.52	5.23	5.98	8.53
	17	69	3.75	3.62	4.15	5.96	0.04	0.04	0.05	0.07	1.54	1.52	1.74	2.54
	18	72	0.67	0.66	0.76	1.11	0.18	0.18	0.21	0.30	0.38	0.38	0.43	0.64
	19	73	0.96	0.95	1.10	1.60	0.86	0.86	0.98	1.44	0.76	0.75	0.87	1.26
	20	74	0.72	0.71	0.82	1.20	0.20	0.20	0.23	0.34	0.42	0.42	0.49	0.71
Otoño	21	49	0.37	0.37	0.42	0.62	0.58	0.58	0.66	0.97	0.35	0.35	0.40	0.59
	22	50	0.15	0.15	0.17	0.25	0.19	0.19	0.22	0.32	0.13	0.13	0.15	0.22
	23	51	0.20	0.20	0.23	0.34	0.27	0.27	0.32	0.46	0.17	0.17	0.20	0.29
	24	52	0.26	0.26	0.30	0.43	0.18	0.18	0.21	0.31	0.17	0.16	0.19	0.28
	25	53	0.33	0.33	0.38	0.56	0.18	0.18	0.20	0.30	0.20	0.20	0.23	0.34
	26	54	0.49	0.49	0.56	0.82	0.76	0.75	0.87	1.27	0.49	0.49	0.56	0.82
	27	55	0.19	0.19	0.22	0.32	0.34	0.34	0.39	0.57	0.21	0.21	0.24	0.35
	28	56	0.42	0.42	0.48	0.71	0.67	0.67	0.77	1.12	0.42	0.42	0.49	0.71
	29	57	0.49	0.49	0.56	0.82	1.31	1.29	1.48	2.16	0.67	0.67	0.77	1.12
	30	58	0.47	0.47	0.54	0.79	0.35	0.35	0.40	0.59	0.32	0.32	0.37	0.54
	31	59	0.76	0.76	0.87	1.27	1.01	1.00	1.15	1.67	0.67	0.67	0.77	1.13
	32	60	1.82	1.79	2.05	2.98	5.25	4.99	5.70	8.15	2.39	2.34	2.68	3.89
	33	61	0.67	0.66	0.76	1.11	0.85	0.84	0.97	1.41	0.59	0.58	0.67	0.98
	34	63	0.42	0.42	0.49	0.71	0.26	0.26	0.30	0.44	0.29	0.29	0.33	0.48
	35	64	0.48	0.48	0.55	0.81	0.62	0.62	0.71	1.04	0.41	0.41	0.48	0.70
	36	65	0.35	0.35	0.40	0.58	0.25	0.25	0.29	0.42	0.22	0.22	0.26	0.38
	37	66	0.50	0.50	0.58	0.85	0.30	0.30	0.34	0.50	0.32	0.32	0.37	0.54
	38	67	0.47	0.47	0.54	0.79	0.43	0.43	0.50	0.73	0.33	0.33	0.38	0.55
	39	68	1.81	1.78	2.04	2.97	8.09	7.48	8.52	12.03	2.70	2.63	3.02	4.37
	40	69	0.91	0.90	1.03	1.51	4.00	3.85	4.40	6.33	1.95	1.91	2.19	3.19
	41	70	1.36	1.34	1.54	2.25	6.17	5.81	6.63	9.44	2.00	1.96	2.25	3.27
	42	71	0.49	0.49	0.56	0.82	0.18	0.18	0.21	0.30	0.28	0.28	0.32	0.47
	43	73	0.53	0.53	0.61	0.89	0.32	0.31	0.36	0.53	0.34	0.34	0.39	0.58
	44	74	0.22	0.22	0.26	0.38	0.05	0.05	0.06	0.08	0.12	0.12	0.14	0.20

Cuadro D6. Conductividad eléctrica experimental y teórica de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla.

Muestreo	No.	Estación	CE <sub>Experimental</sub> μS cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma mmol.L <sup>-1</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	CE <sub>teórica</sub> μS cm <sup>-1</sup>	Rango
Primavera	1	47	83	0.12 6	0.18 8	0.44 22	0.08 6	0.82	0.02 2	0.57 25	0.15 11	0.05 4	0.79	84	1.0
	2	48	129	0.18 9	0.24 11	0.75 37	0.10 7	1.27	0.04 3	0.81 35	0.26 20	0.12 9	1.23	132	1.0
	3	54	186	0.48 25	0.50 23	0.67 33	0.16 12	1.81	0.00 0	1.21 53	0.40 30	0.18 13	1.79	189	1.0
	4	56	256	0.58 30	0.65 30	1.10 54	0.20 14	2.53	0.00 0	1.93 84	0.40 30	0.12 9	2.45	252	1.0
	5	57	897	2.40 125	2.60 121	3.57 175	0.29 21	8.86	0.00 0	5.61 245	2.60 197	0.39 29	8.60	912	1.0
	6	58	132	0.24 12	0.30 14	0.72 35	0.04 3	1.30	0.00 0	0.67 29	0.48 36	0.12 9	1.27	139	0.9
	7	59	161	0.20 10	0.26 12	1.04 51	0.08 6	1.58	0.06 5	1.01 44	0.35 27	0.12 9	1.54	164	1.0
	8	60	1332	2.50 130	3.05 142	7.18 351	0.42 30	13.15	0.00 0	7.84 342	4.62 351	0.35 26	12.81	1372	1.0
	9	61	672	1.80 94	1.90 89	2.75 134	0.19 14	6.64	0.00 0	3.97 173	2.10 159	0.40 30	6.47	692	1.0
	10	62	1343	6.90 359	1.10 51	4.94 242	0.32 23	13.26	0.00 0	8.84 385	3.50 266	0.58 43	12.92	1369	1.0
	11	63	169	0.18 9	0.23 11	1.21 59	0.05 4	1.67	0.04 3	1.13 49	0.32 24	0.14 10	1.63	170	1.0
	12	64	149	0.25 13	0.32 15	0.84 41	0.06 4	1.47	0.02 2	0.98 43	0.28 21	0.15 11	1.43	150	1.0
	13	65	61	0.12 6	0.18 8	0.22 11	0.08 6	0.60	0.02 2	0.33 14	0.15 11	0.08 6	0.58	65	0.9
	14	66	107	0.20 10	0.32 15	0.37 18	0.17 12	1.06	0.00 0	0.65 28	0.25 19	0.12 9	1.02	112	1.0
	15	67	694	0.52 27	0.64 30	4.79 234	0.90 65	6.85	0.00 0	0.00 0	0.85 65	5.79 428	6.64	848	0.8
	16	68	464	0.48 25	0.56 26	2.92 143	0.62 45	4.58	0.00 0	0.00 53	0.70 278	3.76 278	4.46	569	0.8
	17	69	579	0.76 40	0.92 43	3.44 168	0.60 43	5.72	0.00 0	0.08 3	0.65 49	4.81 355	5.54	702	0.8
	18	72	77	0.18 9	0.20 9	0.29 14	0.09 6	0.76	0.02 2	0.49 21	0.20 15	0.03 2	0.74	80	1.0
	19	73	156	0.38 20	0.45 21	0.62 30	0.09 6	1.54	0.00 0	1.05 46	0.38 29	0.07 5	1.50	157	1.0
	20	74	82	0.20 10	0.25 12	0.34 17	0.02 1	0.81	0.00 0	0.45 20	0.30 23	0.04 3	0.79	85	1.0
Otoño	21	49	321	2.04 106	0.56 26	0.42 21	0.08 6	3.10	0.00 0	1.75 76	0.80 61	0.62 46	3.17	341	0.9
	22	50	221	1.67 87	0.32 15	0.15 7	0.04 3	2.18	0.00 0	1.10 48	0.62 47	0.40 30	2.12	237	0.9
	23	51	263	2.08 108	0.24 11	0.22 11	0.06 4	2.60	0.00 0	1.12 49	0.55 42	0.86 64	2.53	289	0.9
	24	52	121	0.77 40	0.21 10	0.18 9	0.04 3	1.20	0.00 0	0.57 25	0.55 42	0.05 4	1.17	132	0.9
	25	53	89	0.41 21	0.25 12	0.19 9	0.03 2	0.88	0.00 0	0.55 24	0.25 19	0.06 4	0.86	92	1.0
	26	54	288	1.91 99	0.35 16	0.52 25	0.06 4	2.84	0.00 0	1.88 82	0.75 57	0.12 9	2.75	293	1.0
	27	55	354	2.76 144	0.38 18	0.24 12	0.12 9	3.50	0.00 0	2.28 99	0.92 70	0.22 16	3.42	367	1.0
	28	56	295	1.65 86	0.72 34	0.46 22	0.08 6	2.91	0.00 0	1.96 85	0.70 53	0.17 13	2.83	299	1.0
	29	57	1261	7.70 400	3.25 151	1.15 56	0.35 25	12.45	0.00 0	6.53 285	3.92 298	1.68 124	12.13	1340	0.9
	30	58	134	0.51 27	0.41 19	0.32 16	0.08 6	1.32	0.00 0	0.66 29	0.44 33	0.18 13	1.28	143	0.9
	31	59	245	0.57 30	1.02 48	0.68 33	0.15 11	2.42	0.00 0	1.52 66	0.61 46	0.23 17	2.36	251	1.0
	32	60	243	0.93 48	0.75 35	0.61 30	0.11 8	2.40	0.00 0	1.30 57	0.85 65	0.19 14	2.34	256	0.9
	33	61	1913	7.71 401	6.00 280	4.76 233	0.42 30	18.89	0.00 0	9.77 426	8.30 630	0.33 24	18.40	2024	0.9
	34	63	108	0.35 18	0.40 19	0.26 13	0.06 4	1.07	0.00 0	0.60 26	0.30 23	0.14 10	1.04	113	1.0
	35	64	238	0.94 49	0.87 41	0.46 22	0.08 6	2.35	0.00 0	1.25 55	0.75 57	0.29 21	2.29	251	0.9
	36	65	119	0.58 30	0.30 14	0.23 11	0.04 3	1.15	0.00 0	0.65 28	0.37 28	0.16 12	1.18	127	0.9
	37	66	104	0.41 21	0.25 12	0.29 14	0.08 6	1.03	0.00 0	0.63 27	0.28 21	0.08 6	0.99	108	1.0
	38	67	212	1.24 64	0.35 16	0.42 21	0.08 6	2.09	0.00 0	0.60 26	0.52 39	0.90 67	2.02	239	0.9
	39	68	691	2.25 117	1.82 85	2.58 126	0.17 12	6.82	0.00 0	2.76 209	3.88 287	6.64 287	6.64	836	0.8
	40	69	469	2.56 133	0.71 33	1.16 57	0.20 14	4.63	0.00 0	0.00 140	1.84 197	2.67 197	4.51	574	0.8
	41	70	714	2.48 129	2.14 100	2.07 101	0.36 26	7.05	0.00 0	0.00 342	4.50 177	2.39 177	6.89	874	0.8
	42	71	101	0.40 21	0.25 12	0.28 14	0.06 4	0.99	0.00 0	0.38 17	0.32 24	0.26 19	0.96	111	0.9
	43	73	116	0.37 19	0.36 17	0.32 16	0.10 7	1.15	0.00 0	0.58 25	0.38 29	0.16 12	1.12	125	0.9
	44	74	65	0.29 15	0.19 9	0.11 5	0.05 4	0.64	0.00 0	0.36 16	0.24 18	0.02 1	0.62	68	1.0

Cuadro D7. Presión osmótica experimental y teórica de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla.

Muestreo	No.	Estación	pH	CE	STD	$\pi_{\text{Teórica}}$	$\pi_{\text{Experimental}}$
				$\mu\text{S cm}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$	$\pi = nRT$	$\pi = 0.0004/0.6960 \text{ STD}$
						atm	atm
Primavera	1	47	8.7	83	63.37	0.035	0.036
	2	48	8.6	129	97.00	0.054	0.056
	3	54	8.1	186	139.36	0.074	0.080
	4	56	8.0	256	196.98	0.105	0.113
	5	57	7.3	897	645.03	0.361	0.371
	6	58	8.0	132	93.84	0.055	0.054
	7	59	8.9	161	120.43	0.069	0.069
	8	60	7.8	1332	950.74	0.563	0.546
	9	61	8.1	672	479.63	0.271	0.276
	10	62	7.5	1343	1002.86	0.536	0.576
	11	63	8.8	169	129.36	0.074	0.074
	12	64	9.3	149	112.40	0.062	0.065
	13	65	8.8	61	44.38	0.024	0.026
	14	66	6.7	107	80.42	0.043	0.046
	15	67	2.5	694	485.94	0.245	0.279
	16	68	3.5	464	324.20	0.162	0.186
	17	69	3.6	579	399.57	0.196	0.230
	18	72	9.4	77	57.46	0.031	0.033
	19	73	8.3	156	116.21	0.063	0.067
		20	74	8.2	82	57.88	0.033
Otoño	21	49	7.0	321	233.25	0.114	0.134
	22	50	7.7	221	155.93	0.076	0.090
	23	51	7.8	263	187.47	0.087	0.108
	24	52	7.7	121	83.57	0.045	0.048
	25	53	7.3	89	64.57	0.034	0.037
	26	54	8.1	288	211.00	0.108	0.121
	27	55	8.0	354	261.23	0.128	0.150
	28	56	8.0	295	215.34	0.109	0.124
	29	57	6.1	1261	873.21	0.447	0.502
	30	58	7.2	134	93.80	0.050	0.054
	31	59	6.9	245	176.69	0.095	0.102
	32	60	6.4	1913	1290.85	0.741	0.742
	33	61	7.0	243	170.40	0.093	0.098
	34	63	6.7	108	77.13	0.041	0.044
	35	64	6.6	238	165.48	0.088	0.095
	36	65	6.7	119	85.88	0.044	0.049
	37	66	6.4	104	76.18	0.040	0.044
	38	67	5.5	212	145.06	0.070	0.083
	39	68	3.0	691	429.91	0.232	0.247
	40	69	3.6	469	297.97	0.151	0.171
	41	70	2.9	714	424.05	0.255	0.244
	42	71	5.1	101	69.53	0.037	0.040
	43	73	7.3	116	82.78	0.045	0.048
		44	74	7.9	65	45.80	0.025

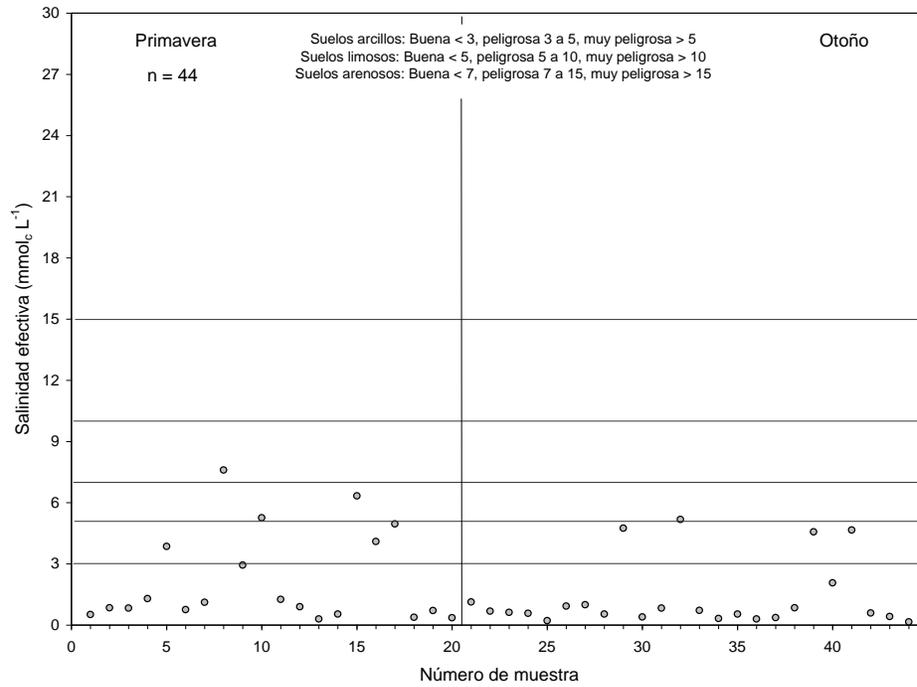


Figura D1. Evaluación de la salinidad efectiva de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.

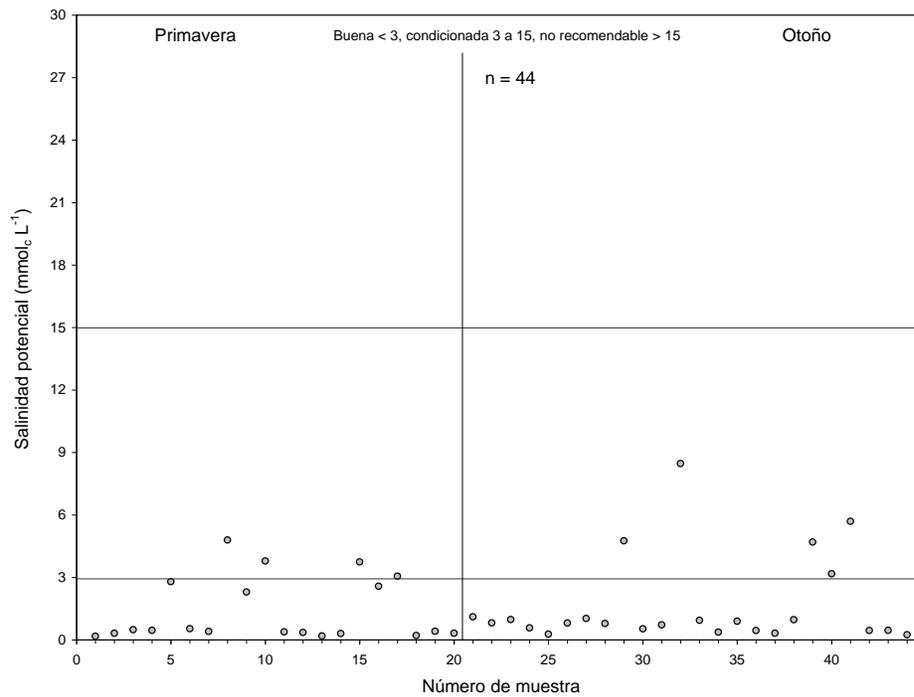


Figura D2. Evaluación de la salinidad potencial de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera y otoño 2008.

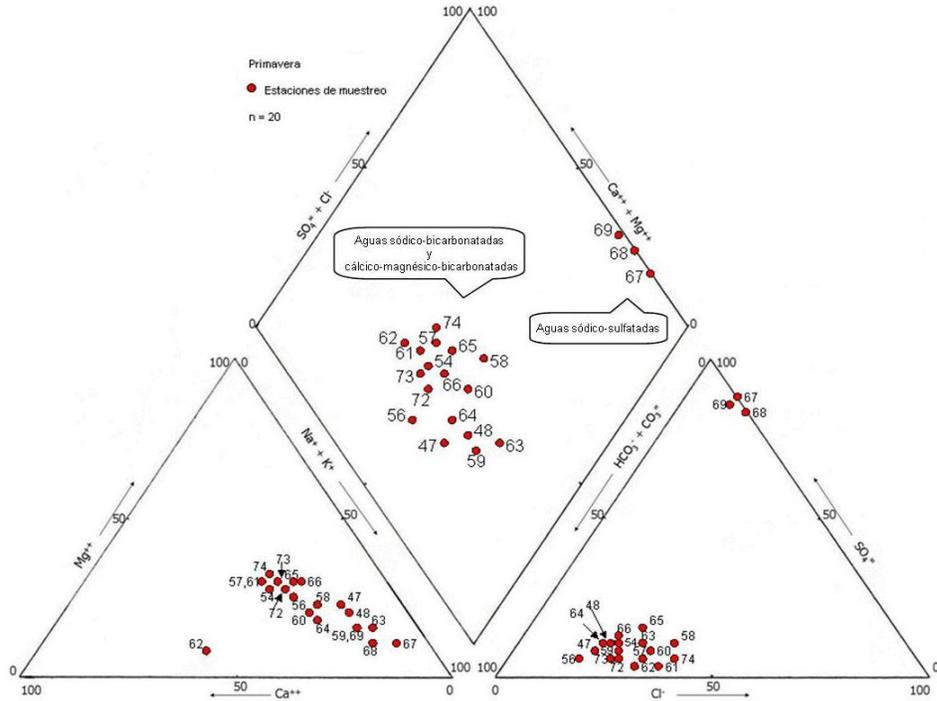


Figura D3. Clasificación hidrogeoquímica de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Primavera 2008.

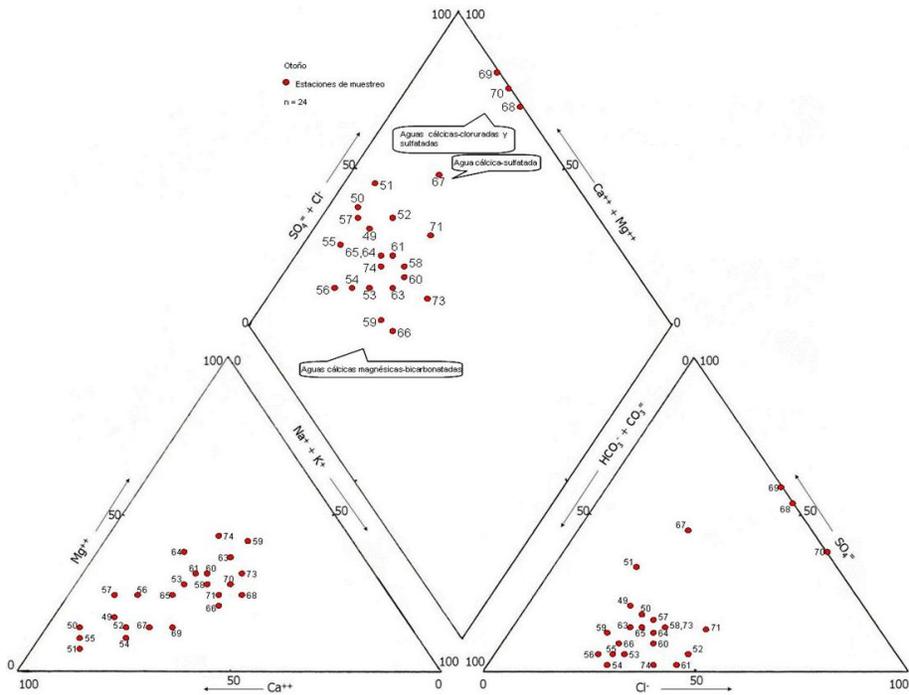


Figura D4. Clasificación hidrogeoquímica de las aguas de la Sierra Norte, estado de Puebla. Otoño 2008.

## 12. GLOSARIO

**Anticlinal.** Se denomina anticlinal a un pliegue de la corteza terrestre en forma de lomo cuyos flancos se inclinan en sentidos opuestos.

**Cono cinerítico.** Es un pequeño volcán que tiene pendientes inclinadas formadas en gran medida por la acumulación de piroclastos (cenizas, escorias y rocas) que han sido eruptados explosivamente desde el conducto del volcán. Cuando el material cae al piso, generalmente se acumula para formar un cono simétrico y de pendientes inclinadas alrededor del conducto. El Parícutín en Michoacán es un ejemplo de cono cinerítico.

**Diagénesis.** Es el proceso de formación de una roca a partir de sedimentos sueltos que sufren un proceso de compactación.

**Erupción pliniana.** Es un tipo de erupción volcánica asociada a magmas de composición félsica (ácidos). Se caracteriza por su alto grado de explosividad, con manifestaciones muy violentas en las cuales se expulsan grandes volúmenes de gas volcánico, fragmentos y cenizas. Recibe su nombre en honor a Plinio el Viejo, quien falleció en una erupción de este tipo en el monte Vesubio.

**Máfico.** Es un adjetivo que se aplica a un silicato o roca que es rico en magnesio y hierro. Son característicos de la corteza oceánica y la parte inferior (en contacto con el manto) de la corteza continental.

**Metasomatismo.** Está asociado a la presencia de fluidos calientes que contienen gran cantidad de iones disueltos, y debido a la interacción de la roca con los fluidos hay sustracción o adición de compuestos químicos. Un ejemplo de

metasomatismo es la transformación del olivino en serpentina si hay presencia de agua.

**Plataforma continental.** Circunda a los continentes hasta una profundidad media de 200 m, lo cual, dada su escasa pendiente, representa una anchura de cerca de 90 km en promedio. Su límite exterior se caracteriza precisamente por un cambio brusco de esta pendiente: el fondo se inclina en forma de talud continental, en cuya base se halla el fondo del océano.

**Plegamiento o pliegue.** Es una deformación de las rocas, generalmente sedimentarias, en la que elementos de carácter horizontal, como los estratos o los planos de esquistocidad (en el caso de rocas metamórficas), quedan curvados formando ondulaciones alargadas y más o menos paralelas entre sí. Los pliegues se originan por esfuerzos de compresión sobre las rocas que no llegan a romperlas.

**Sinclinal.** El sinclinal es la parte cóncava de un pliegue de la corteza terrestre debido a las fuerzas de compresión de un movimiento orogénico, cuyos estratos convergen hacia abajo, es decir en forma de cuenca.

**Skarn.** Es un tipo de roca metamórfica y mineralizada asociada, generada por la interacción de carbonatos como la caliza o la dolomita con fluidos hidromagmáticos o cuerpos ígneos a través de metamorfismo de contacto.

**Solfataras.** Consisten en emisiones de vapor de agua y ácido sulfhídrico, de temperatura inferior a 100 °C.