



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**COMPOSICIÓN IÓNICA DEL AGUA DEL BOSQUE DE
NIEBLA DE VERACRUZ-PUEBLA**

MARIO FRANCISCO SANTOYO DE LA CRUZ

T E S I S:

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

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO, MAYO 2016

La presente tesis titulada: COMPOSICIÓN IÓNICA DEL AGUA DEL BOSQUE DE NIEBLA DE VERACRUZ - PUEBLA, realizada por el alumno: MARIO FRANCISCO SANTOYO DE LA CRUZ, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. HÉCTOR MANUEL ORTEGA ESCOBAR

ASESOR



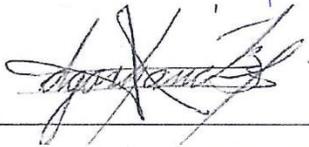
DR. CARLOS RAMÍREZ AYALA

ASESOR



M. C. ENRIQUE MARTÍNEZ VILLEGAS

ASESOR



DR. EDGAR IVÁN SÁNCHEZ BERNAL

ASESOR



DR. OSCAR RAÚL MANCILLA VILLA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Mayo de 2016.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Ignacio Santoyo Ibarra y Teresa de la Cruz Flores. A mis hermanos Adriana, Gustavo y Alejandro. Gracias familia.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT), por el apoyo de la beca de manutención.

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

A los profesores: Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar, Dr. Carlos Ramírez Ayala, M.C. Enrique Martínez Villegas, Dr. Edgar Iván Sánchez Bernal, Dr. Oscar Raúl Mancilla Villa y Dr. Héctor Flores Magdaleno.

Y, a todas las personas con las que conviví buenos momentos en el Colegio.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. EL AGUA A NIVEL MUNDIAL.....	3
2.2. EL AGUA EN MÉXICO	4
2.3. EL BOSQUE DE NIEBLA	4
2.4. EL BOSQUE DE NIEBLA EN MÉXICO	5
2.5. INTEMPERISMO.....	6
2.5.1. Intemperismo físico – desintegración.....	7
2.5.2. Intemperismo químico – descomposición.....	7
2.5.3. Intemperismo-biológico	8
2.6. ANALISIS DE AGUAS	8
2.7. PROCESOS DE ACUMULACIÓN DE SALES.....	8
2.8. SOLUBILIDAD Y GEOQUÍMICA DE IONES.....	9
2.9. SODIO.....	10
2.10. POTASIO	11
2.11. MAGNESIO	12
2.12. CALCIO	12
2.13. CARBONATOS.....	13
2.14. BICARBONATOS	13
2.15. SULFATOS	14
2.16. CLORO.....	15
2.17. BORO.....	16
2.18. NITRATOS	16
2.19. FOSFATOS.....	16
2.20. SILICIO	17
2.21. AGUAS SUPERFICIALES	18
2.22. CALIDAD DEL AGUA EN LA AGRICULTURA	19
2.23. SALINIDAD EN LAS AGUAS DE RIEGO.....	20

2.24.	EFECTO DE LAS SALES EN LOS CULTIVOS.....	20
2.25.	PELIGRO DE SALINIDAD	21
2.26.	SALINIDAD EFECTIVA	22
2.27.	SALINIDAD POTENCIAL.....	23
2.28.	PRESIÓN OSMÓTICA	24
2.29.	SODICIDAD EN LAS AGUAS DE RIEGO.....	25
2.30.	RELACIÓN ADSORCIÓN DE SODIO ORIGINAL	29
2.31.	RELACIÓN DE ADSORCION DE SODIO AJUSTADO	29
2.32.	RELACION ADSORCION DE SODIO CORREGIDO.....	33
2.33.	PORCIENTO DE SODIO INTERCAMBIABLE	35
2.34.	TOXICIDAD DEL AGUA.....	35
2.35.	PROBLEMAS DE INFILTRACIÓN DEL AGUA.....	37
2.36.	CARBONATO DE SODIO RESIDUAL	38
2.37.	CUENCA DEL ORIENTAL	39
2.38.	REGIÓN DE ZACAPOAXTLA-TEZIUTLAN PUEBLA	41
2.39.	REGIÓN DE MARTÍNEZ DE LA TORRE VERACRUZ	42
2.40.	REGIÓN DE POZA RICA VERACRUZ.....	42
2.41.	REGIÓN DE PANUCO VERACRUZ.....	43
2.42.	REGIÓN DE COATEPEC VERACRUZ.....	44
3.	OBJETIVOS	46
3.1.	OBJETIVO GENERAL	46
3.2	OBJETIVO PARTICULAR.....	46
4.	HIPÓTESIS	46
5.	MATERIALES Y MÉTODO	47
5.1.	ZONA DE ESTUDIO	47
5.2.	ANÁLISIS DE LABORATORIO.....	47
5.3.	COMPROBACIÓN DE LOS DATOS	49
5.3.1.	Balance Anión – Cation.....	49
5.3.2.	Solidos Totales Disueltos = sólidos disueltos totales calculados	49
5.3.3.	Conductividad eléctrica medida = conductividad eléctrica calculada	49
5.3.4.	Conductividad eléctrica medida y la suma de iones	50
5.3.5.	Total de solidos disueltos medidos y calculados a un rango de CE.....	50
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
6.1.	LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ÁREAS DE MUESTREO	51
6.2.	COMPOSICIÓN IÓNICA DE LAS AGUAS	57

6.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	65
6.4. COMPROBACIÓN DE LA EXACTITUD DE LOS DATOS ESTUDIADOS	67
6.5. DISTRIBUCIÓN DE CATIONES Y ANIONES	69
6.6. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	72
6.7. RELACIÓN DE LOS SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS Y LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	75
6.8. PRESIÓN OSMÓTICA.....	77
6.9. SALINIDAD EFECTIVA.....	79
6.10. SALINIDAD POTENCIAL.....	81
6.11. CLASIFICACIÓN DE ACUERDO A LA RAS.....	85
6.12. PELIGROS DE INFILTRACIÓN DEL AGUA	96
6.13. EFECTO DE LOS CARBONATOS Y BICARBONATOS	100
6.14. ÍNDICE DE SATURACIÓN	100
6.15. HIDROQUÍMICA.....	103
6.16. TOXICIDAD DE IONES ESPECIFICOS	107
6.16.1. BORO	107
6.16.2. NITRATOS.....	110
6.16.3. FOSFATOS.....	113
6.16.4. SILICIO	116
7. CONCLUSIONES	118
8. RECOMENDACIONES	119
9. LITERATURA CITADA	120

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Los siguientes elementos muestran el contenido de los principales elementos en la corteza terrestre (Kovda et al, 1967).	9
Cuadro 2. Máxima solubilidad en agua de algunas sales comunes encontradas en suelos a diferentes temperaturas (Kovda et al, 1967).	10
Cuadro 3. Ejemplos de sulfatos.	15
Cuadro 4. Clasificación de agua en base a la salinidad efectiva.	23
Cuadro 5. Clasificación de aguas con respecto a la salinidad potencial.	23
Cuadro 6. Calculo de los valores de p _{Hc} teórico.	32
Cuadro 7. Valores de la concentración de Ca° en el agua.	34
Cuadro 8. Tolerancia relativa de algunos cultivos a sales, cuando se usa riego por aspersión (maas, 1984).	36
Cuadro 9. Análisis físico-químicos aplicados a las aguas.	48
Cuadro 10. Criterios de aceptación para el balance de aniones y cationes.	49
Cuadro 11. Localización geográfica de los puntos de muestreo de las aguas del bosque de niebla de Veracruz, Puebla y Tlaxcala.	52
Cuadro 12. Localización geográfica de los puntos de muestreo de las aguas con alta conductividad eléctrica de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	54
Cuadro 13. Composición iónica de las aguas del boque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	59
Cuadro 14. Composición iónica de las aguas muestreadas con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Tlaxcala y Tamaulipas.	64
Cuadro 15. Análisis estadístico de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	65
Cuadro 16. Análisis estadístico de las aguas con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	66
Cuadro 17. Factores de conductividad eléctrica de los iones que frecuentemente se encuentran en las aguas.	67
Cuadro 18. Análisis estadístico de la frecuencia de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	73
Cuadro 19. Análisis estadístico de la frecuencia de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de las muestras con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	74
Cuadro 20. Salinidad efectiva y clasificación de las muestras de agua del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	79
Cuadro 21. Salinidad efectiva y clasificación de las muestras de agua con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	79

Cuadro 22. Salinidad efectiva y valoración de las muestras del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	80
Cuadro 23. Salinidad efectiva y valoración de las muestras con conductividad eléctrica elevada de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	81
Cuadro 24. Salinidad potencial y clasificación de las muestras de agua del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	82
Cuadro 25. Salinidad potencial y clasificación de las muestras de agua con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	82
Cuadro 26. Salinidad potencial y valoración de las muestras del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	83
Cuadro 27. Salinidad potencial y valoración de las muestras con conductividad eléctrica elevada de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	84
Cuadro 28. Resultados del presente trabajo, de la clasificación S1, de la cuenca Oriental.	85
Cuadro 29. Resultados de (Mancilla, 2012), de la clasificación S1, de la cuenca Oriental.	85
Cuadro 30. Valores y clasificación de acuerdo a la sodicidad y conductividad eléctrica de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	90
Cuadro 31. Número de muestras de acuerdo a la clasificación de las relaciones de adsorción de sodio y conductividad eléctrica, de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	91
Cuadro 32. Valores y clasificación de acuerdo a la sodicidad y conductividad eléctrica de las aguas con conductividades eléctricas elevadas, de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	92
Cuadro 33. Número de muestras de acuerdo a la clasificación de las relaciones de adsorción de sodio y conductividad eléctrica, de las aguas con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	92
Cuadro 34. Numero de muestras de acuerdo al peligro de infiltración de agua. Muestreo A (bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz) y muestreo B (aguas con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas).	96
Cuadro 35. Número de muestras y clasificación de las aguas, considerando el porciento de sodio encontrado, carbonato de sodio residual e índice de saturación. .	100
Cuadro 36. Indicadores de calidad del agua, en relación al sodio y al índice de saturación, de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	101
Cuadro 37. Indicadores de calidad del agua, en relación al sodio y al índice de saturación, de las aguas con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	102
Cuadro 38. Clasificación, número y porcentaje de la hidroquímica de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	104
Cuadro 39. Clasificación, número y porcentaje de la hidroquímica de las aguas con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	104

Cuadro 40. Clasificación y número de muestras de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz, en base al ion boro	108
Cuadro 41. Clasificación y número de muestras de las aguas con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas, en base al ion boro.	109
Cuadro 42. Cuadro. Clasificación y número de muestras de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz, en base al ion nitrato.	111
Cuadro 43. Clasificación y número de muestras de las aguas con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas, en base al ion nitrato.	112
Cuadro 44. Clasificación y número de muestras de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz, en base al ion fosfato.....	114
Cuadro 45. Clasificación y número de muestras de las aguas con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas en base al ion fosfato.....	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Origen de bicarbonatos y carbonatos en agua dulce.....	14
Figura 2. Diagrama de clasificación de aguas propuesto por (Richards 1982).....	28
Figura 3. Mapa de las estaciones de muestreo de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	55
Figura 4. Mapa de las estaciones de muestreo de las aguas con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.....	56
Figura 5. Conductividad eléctrica medida (meq L^{-1}) y conductividad eléctrica calculada (meq L^{-1}) de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.....	68
Figura 6. Conductividad eléctrica medida (meq L^{-1}) y conductividad eléctrica calculada (meq L^{-1}) de las aguas con conductividad eléctrica elevada de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	68
Figura 7. Composición de cationes de las aguas muestreadas en el bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	70
Figura 8. Composición de aniones de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	70
Figura 9. Composición de cationes de las aguas muestreadas con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.....	71
Figura 10. Composición de aniones de las aguas muestreadas con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.....	71
Figura 11. Distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.....	73
Figura 12. Distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de las muestras con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	74
Figura 13. Relación de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y la concentración de sólidos totales disueltos (mg L^{-1}) de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.....	76
Figura 14. Relación de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y la concentración de sólidos totales disueltos (mg L^{-1}) de las aguas con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	76
Figura 15. Relación de la conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$ y la presión osmótica (atm), de las muestras del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.....	78
Figura 16. Relación de la conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$ y la presión osmótica (atm), de las muestras con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	78
Figura 17. Dispersión de los valores de RAS y RAS ajustado (meq L^{-1}), de las muestras del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	87

Figura 18. Dispersión de los valores de RAS y RAS° (meq L ⁻¹), de las muestras del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.....	87
Figura 19. Dispersión de los valores de RAS con RASaj y RAS° (meq L ⁻¹), de las muestras del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.....	88
Figura 20. Dispersión de los valores de RAS y RAS aj de las muestras con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	88
Figura 21. Dispersión de los valores de RAS y RAS° de las muestras con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	89
Figura 22. Dispersión de los valores de RAS con RAS° y RAS aj de las muestras con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	89
Figura 23. Diagrama de clasificación RAS y CE, de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	93
Figura 24. Diagrama de la clasificación RASaj y CE de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.....	94
Figura 25. Diagrama de clasificación RAS° y CE, de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	95
Figura 26. Reducción de la infiltración con respecto a la relación de adsorción de sodio y la conductividad eléctrica, del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.....	97
Figura 27. Reducción de la infiltración con respecto a la relación de adsorción de sodio ajustado y la conductividad eléctrica, del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	98
Figura 28. Reducción de la infiltración con respecto a la relación de adsorción de sodio corregido y la conductividad eléctrica, del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	99
Figura 29. Diagrama de Piper. Composición hidroquímica de las muestras de agua del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.....	105
Figura 30. Diagrama de Piper. Composición hidroquímica de las muestras de agua con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.....	106
Figura 31. Concentraciones del ion boro, de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	108
Figura 32. Concentraciones del ion boro, de las aguas con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	109
Figura 33. Concentraciones del ion nitrato, de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	111
Figura 34. Concentraciones del ion nitrato, de las aguas con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	112
Figura 35. Concentraciones del ion fosfato, de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.	114
Figura 36. Concentraciones del ion fosfato, de las aguas con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.	115

Figura 37. Concentraciones del ion silicio, de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz. 117

Figura 38. Concentraciones del ion silicio, de las aguas con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas. 117

COMPOSICIÓN IÓNICA DEL AGUA DEL BOSQUE DE NIEBLA DE VERACRUZ-PUEBLA

Mario Francisco Santoyo de la Cruz, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2016.

RESUMEN

El recurso agua y la forma en que se utiliza son fundamentales para hacer frente al reto de mejorar la seguridad alimentaria en todo el mundo. Los bosques de niebla de Veracruz y Puebla envuelven habitualmente a la vegetación, son ecosistemas frágiles y albergan la mayor riqueza de especies en relación con el área que ocupan, además de producir agua a las partes bajas. El agua superficial es aquella que se encuentra circulando o en reposo sobre la superficie de la tierra. Estas masas de agua forman ríos, lagos, lagunas, pantanos, charcas, humedales, y otros similares, sean naturales o artificiales. La calidad del agua se refiere a las características de un suministro de agua, que va a influir en su idoneidad para un uso específico, es decir, qué tan bien la calidad cumple con las necesidades del usuario. Este trabajo de investigación tiene como propósito, determinar las concentraciones de los principales iones del agua del bosque de niebla de Veracruz, Puebla y Tlaxcala; se incluyen estudios de salinidad y sodicidad, carbonato de sodio residual, peligros de infiltración, presión osmótica y toxicidad de iones específicos, así como la clasificación y recomendación de las aguas, según las normas agronómicas de importancia. Se muestreo agua de 66 estaciones y se realizaron las determinaciones fisico-químicas de iones.

El sodio (Na^+) es el catión más dominante. El bicarbonato (HCO_3^-) es el anión más dominante. La conductividad eléctrica de las muestras del bosque de niebla 40-346 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (50.54%) y de las aguas con conductividades elevadas 5000-17000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (72.00%). Salinidad efectiva de las muestras del bosque de niebla es buena (67.79%) y de las aguas con conductividades elevadas es no recomendable (100%). Salinidad potencial de las muestras del bosque de niebla es buena (76.27) y de las aguas con conductividades elevadas es no recomendable (100%). La clasificación S1, de las muestras del bosque de niebla es: RAS (96.61%), RASaj (93.22%) y RAS° (94.91%). Mientras que el (100%) de las aguas con conductividades elevadas, en las tres relaciones de adsorción de sodio es S4. Existe peligro de infiltración ligera en la mayoría de las muestras del bosque de niebla. Y peligro severo en todas las muestras con conductividades elevadas. La clasificación hidroquímica muestra que el (18.64%) de las aguas del bosque de niebla son bicarbonatadas-cálcicas y bicarbonatadas-magnésicas (32.75%).

Palabras clave: sodicidad, salinidad, infiltración, carbonato de sodio.

IONIC COMPOSITION OF WATER MIST FOREST VERACRUZ-PUEBLA

Mario Francisco Santoyo de la Cruz, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2016.

ABSTRACT

Water resource and the way it is used are key to addressing the challenge of improving food security worldwide. It is likely that demographic pressures and increased competition for land and water increase vulnerability to food insecurity. Cloud forests of Veracruz and Puebla usually involve vegetation, they are fragile ecosystems and are home to the greatest wealth of species in relation to the area they occupy, and produce water to the lower parts. Surface water is one that is moving or at rest on the surface of the earth. These bodies of water are rivers, lakes, ponds, marshes, ponds, wetlands, and the like, whether natural or artificial. Water quality refers to the characteristics of a water supply, which will influence their suitability for a specific use, how well the quality meets user needs. This research aims to determine the concentrations of major ions water cloud forest of Veracruz, Puebla and Tlaxcala; studies salinity and sodium carbonate, residual sodium dangers infiltration, osmotic pressure and toxicity of specific ions, and the classification and recommendation of water, according to the agronomic rules of importance are included. 66 stations water was sampling and physicochemical ion determinations were made. Sodium (Na^+) is the most dominant cation. Bicarbonate (HCO_3^-) it is the most dominant anion. The electrical conductivity of the samples misty forest $40\text{-}346 \text{ mS cm}^{-1}$ (50.54%) and water with high conductivities $5000\text{-}17000 \text{ mS cm}^{-1}$ (72.00%). Salinity effective samples cloud forest is good (67.79%) and water with high conductivity is not recommended (100%). Salinity potential samples cloud forest is good (76.27) and water with high conductivity is not recommended (100%). The S1 classification, samples cloud forest is: RAS (96.61%), RASaj (93.22%) and RAS ° (94.91%). While the (100%) of water with high conductivities in the three sodium adsorption ratios is S4. There is a risk of slight infiltration in most samples cloud forest. And severe danger in all samples with high conductivities. Hydrochemical classification shows that (18.64%) of the waters of cloud forest are bicarbonate-calcium-magnesium and bicarbonate (32.75%).

Keywords: sodicity, salinity, infiltration, sodium carbonate.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la salinización y la contaminación de las aguas y la degradación de los ecosistemas relacionados con el agua, es de atención para los gobiernos y científicos ambientales. En muchos ríos grandes, solo el 5 por ciento de los antiguos volúmenes de agua permanecen en los caudales y algunos ríos, ya no llegan al mar todo el año. Los grandes lagos y mares interiores se han reducido y la mitad de los humedales de Europa y América del Norte ya no existen (FAO, 2011). La disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1,386 millones de km³, de los cuales el 97.5% es agua salada y sólo el 2.5%, es decir 35 millones de km³, es agua dulce México, es la octava nación del mundo con mayor extracción de agua y porcentaje de uso agrícola, industrial y abastecimiento público con 80 km³ al año; 76% es de uso agrícola; 9% de uso industrial y 14% de abastecimiento público (CONAGUA, 2011).

El bosque de niebla conocido también como bosque mesófilo de montaña, puede encontrarse en forma de islas a lo largo de la Sierra Madre Oriental y Occidental. Este tipo de bosque se caracteriza por estar envuelto casi constantemente por neblina. En México, las áreas que ocupan estos bosques se han reducido en por lo menos 50%, catalogándose por algunos investigadores como "hábitat en peligro de extinción". A nivel mundial los bosques de neblina son uno de los ecosistemas más amenazados. Entre las actividades humanas que más los han afectado podemos mencionar: el cultivo del café y de los árboles frutales así como la ganadería extensiva (Alvarado, 2014).

Ante este panorama se confirma la preocupación y al análisis que se plantea en el presente estudio respecto al impacto que tiene la distribución, concentración de iones y calidad del agua, en relación con el suelo y los cultivos de una porción del área de los estados de Tlaxcala, Puebla, Veracruz y Tamaulipas. Por otra parte, respecto al uso del agua y del suelo, existe una relación muy importante y directa con la producción y seguridad de los alimentos que se producen en las zonas agrícolas circundantes al bosque de niebla, que ha ido disminuyendo notablemente a causa de un crecimiento no planeado de las áreas urbanas. Al incrementarse los volúmenes de agua para uso urbano se ha ido incrementando también, el volumen de agua residual para los cultivos (Sarabia *et al*, 2011).

En este trabajo, se incluyeron las aguas de niveles freáticos de las zonas lacustres de la cuenca Oriental en Puebla y Tlaxcala, del bosque de niebla de Puebla y Veracruz, también se incluyeron las aguas de los lagos cráter (maars) de Alchichica, La Preciosa, Quechulac, Atexcac, Aljojuca y Tecuitlapa. Y aguas salinas de Tamaulipas.

La salinidad es la consecuencia de la presencia en el suelo de sales solubles en altas concentraciones. Por sus propias características las sales se pueden encontrar tanto en la fase sólida como en la fase líquida. Por esta razón tiene una extraordinaria movilidad en el suelo. La relación de adsorción de sodio, de una determinada agua de riego, puede ser usada como medida de peligro de sodicidad de esta agua, cuando se tuviesen condiciones ideales de equilibrio. Existe el peligro de la infiltración del agua de riego, cuando no entra en el suelo lo suficientemente rápido durante un ciclo de riego normal, como para permitir la renovación del agua consumida por el cultivo entre dos riegos.

El estudio descriptivo de este trabajo, determino la composición iónica de las aguas, la clasificación de acuerdo a la salinidad y sodicidad en sus tres modalidades, determinación de carbonato de sodio residual, peligro de infiltración, además de analizar otros iones de menor concentración (boro, nitratos, silicio y fosfatos) pero de importancia toxicológica. La finalidad de estos análisis es conocer la calidad agronómica de las aguas usando los parámetros de reconocimiento agrícola internacional. Además de saber los efectos de su uso, en suelos y plantas.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. EL AGUA A NIVEL MUNDIAL

El recurso agua y la forma en que se utiliza son fundamentales para hacer frente al reto de mejorar la seguridad alimentaria en todo el mundo. Es probable que las presiones demográficas y el aumento de la competencia por la tierra y el agua, aumenten la vulnerabilidad a la inseguridad alimentaria, en particular en África y Asia. El desafío de proporcionar alimentos suficientes para todos en el mundo entero nunca ha sido mayor. La población mundial sigue aumentando. La población actual de la Tierra es de 7000 millones de personas aproximadamente, que aumentará, según las previsiones, a unos 9000 millones en 2050. En esa fecha habrán de producirse al año otros 1 000 millones de toneladas de cereales y 200 millones de toneladas adicionales de productos pecuarios. El imperativo de alcanzar ese crecimiento agrícola es mayor en los países en desarrollo, donde el reto no consiste únicamente en producir alimentos, sino en garantizar que las familias tengan un acceso a los mismos con la consiguiente mejora de la seguridad alimentaria. Actualmente, casi 1 000 millones de personas están subnutridas, en particular en el África, Asia y Latinoamérica.

Están aumentando la salinización y la contaminación de los cursos y las masas de aguas, y la degradación de los ecosistemas relacionados con el agua. En muchos ríos grandes, solo el 5 por ciento de los antiguos volúmenes de agua permanecen en los caudales y algunos ríos como el Huang He, ya no llegan al mar todo el año. Los grandes lagos y mares interiores se han reducido y la mitad de los humedales de Europa y América del Norte ya no existen. Los sedimentos provenientes de la erosión del suelo están colmatando los embalses, con la consiguiente reducción de la energía hidroeléctrica y el abastecimiento de agua. El agua subterránea está siendo bombeada de forma intensiva y los acuíferos se están contaminando y salinizando cada vez más en algunas zonas costeras. Gran parte de todos los continentes están experimentando altas tasas de degradación del ecosistema, en particular la disminución de la calidad del suelo (FAO, 2011).

La disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1,386 millones de km³, de los cuales el 97.5% es agua salada y sólo el 2.5%, es decir 35 millones de km³, es agua dulce. De esta cantidad casi el 70% no está disponible para consumo humano debido a que se encuentra en forma de glaciares, nieve o hielo. Del agua que técnicamente está disponible para consumo humano, sólo una pequeña porción se encuentra en lagos, ríos, humedad del

suelo y depósitos subterráneos relativamente poco profundos, cuya renovación es producto de la infiltración. Mucha de esta agua teóricamente utilizable se encuentra lejos de las zonas pobladas, lo cual dificulta o encarece su utilización efectiva (CONAGUA, 2011).

2.2. EL AGUA EN MÉXICO

En el país existen enormes diferencias regionales en la disponibilidad de agua, en tanto que un gran aumento de la población y de las actividades industriales han determinado su disminución. Así, debido a la geografía y al clima destacan dos grandes zonas de disponibilidad natural de agua, la primera de ellas que comprende el sur y sureste y la segunda el norte, centro y noroeste del país. La disponibilidad natural en la primera de ellas es 7 veces mayor que en el resto del territorio nacional (Sainz, 2006).

México es el onceavo país más poblado del planeta y el quinceavo en Producto Interno Bruto (PIB), es la octava nación del mundo con mayor extracción de agua y porcentaje de uso agrícola, industrial y abastecimiento público con 80 km³ al año; 76% es de uso agrícola; 9% de uso industrial y 14% de abastecimiento público.

El territorio nacional, ocupa el octavo lugar a nivel mundial en superficie con infraestructura de riego. Cabe destacar que México es el número 19 a nivel mundial en capacidad de presas de almacenamiento per cápita con 1189 m³ por habitante. Además de tener un estrés hídrico bajo 10 a 20 por ciento (CONAGUA, 2011).

2.3. EL BOSQUE DE NIEBLA

Los bosques en las cimas de las montañas, donde la niebla envuelve habitualmente a la vegetación, son los ecosistemas terrestres más frágiles que existen en respuesta a la perturbación y los que albergan la mayor riqueza de especies en relación con el área que ocupan. La información más fiable sobre los hábitats terrestres se refiere a los bosques, que hoy en día ocupan aproximadamente el 31% de la superficie terrestre del planeta. Se estima que los bosques concentran más de la mitad de las especies animales y vegetales terrestres (la gran mayoría de las cuales se encuentra en los trópicos) y más de dos tercios de la producción primaria neta terrestre, es decir, la transformación de la energía solar en materia vegetal (SCDB, 2010).

En cañadas montañosas donde la niebla cubre de manera frecuente a la vegetación se encuentra el bosque de niebla, que se presenta como manchones o islas, por lo que su distribución es fragmentada. Esta insularidad natural ha favorecido los endemismos y la especiación vicariante que se produce cuando una especie ocupa un área extensa, lo que impide que individuos alejados puedan cruzar barreras geográficas como montañas, desiertos, mares. La presencia frecuente de la niebla tiene un papel relevante en la distribución y dinámica de estos bosques (SEMARNAT, 2009). Al encontrarse inmersos en niebla de forma constante, los suelos húmedos propician una lenta descomposición de la materia orgánica, generando suelos ácidos en los que predominan condiciones anaerobias. Estas condiciones limitan la respiración de las raíces, lo que reduce la absorción de nutrientes y la evapotranspiración (que es la suma de la evaporación y la respiración de las plantas). La presencia de la neblina también interfiere con la incidencia de la radiación solar, lo cual resulta en bajas temperaturas y baja evapotranspiración. Debido al crecimiento limitado por las condiciones de suelo y la baja incidencia de luz, los árboles en el bosque de niebla alcanzan corta estatura y presentan una arquitectura retorcida. Otro de sus atributos sobresalientes es la proliferación de epífitas, plantas que crecen sobre otras plantas. Es común encontrar una carpeta verde donde los musgos recubren troncos y ramas de los árboles, y una gran abundancia de bromélias, helechos y orquídeas, las cuales requieren condiciones de humedad elevada para establecerse y crecer. El bosque de niebla también desempeña un papel clave en la regulación de los ciclos hidrológicos y de los ciclos de nutrientes a nivel del paisaje. Entre sus servicios hidrológicos más sobresalientes se encuentra su función en el mantenimiento de la capacidad de carga de los mantos acuíferos, en la calidad del agua, en la reducción de la carga de sedimentos cuenca abajo y del riesgo de inundaciones, entre otros (CONABIO, 2012).

2.4. EL BOSQUE DE NIEBLA EN MÉXICO

El bosque de niebla se encuentra en las reservas de la biosfera de El Cielo en Tamaulipas, Sierra de Manantlán en Jalisco, Sierra Gorda en Querétaro, Los Tuxtlas en Veracruz, Sierra de Puebla y Veracruz, El Triunfo, La Sepultura, Montes Azules y Volcán Tacaná en Chiapas. El bosque de niebla también está contenido en otras categorías de área natural protegida como los Parques Nacionales (Lagunas de Montebello y Cañón del Río Blanco), entre otros (Williams, 2012).

Existe una alta diversidad de especies, cubriendo menos de 1% del territorio, el bosque de niebla, también conocido como bosque mesófilo de montaña, se calcula que alberga casi 12% de la riqueza de plantas en el país (alrededor de 3 mil especies), de las cuales aproximadamente 30% son endémicas. Estos sistemas también alojan una alta diversidad de fauna que incluye mamíferos, anfibios, aves y mariposas; en estos bosques viven alrededor de 755 especies de vertebrados terrestres. Entre sus especies de aves más emblemáticas cabe mencionar al quetzal (*Pharomachrus mocinno*), que se encuentra en peligro de extinción. El bosque de niebla es hábitat de variedades silvestres de muchas especies de plantas de cultivo, entre ellas la papa, el frijol, la fruta de la pasión, el pepino, el aguacate y el tomate. De especial importancia para México es el pariente silvestre del maíz, *Zea diploperennis*, que habita la sierra de Manantlán en Jalisco. Además, los bosques de niebla albergan numerosas especies a las que las comunidades que viven en ellos y en su área de influencia les han dado usos medicinales, maderables, ornamentales y ceremoniales (CONABIO, 2012).

2.5. INTEMPERISMO

Es la transformación de las rocas y los minerales en la superficie de la tierra o a escasa profundidad mediante dos procesos esenciales: la desintegración que es un proceso físico o mecánico y la descomposición que es un proceso de alteración química.

Muchas rocas y minerales se forman en profundidad dentro de la corteza terrestre, donde la temperatura y presión son notablemente diferentes a las que se registran en la superficie. Así los materiales formados en el interior de la corteza, se encuentran en desequilibrio con respecto a las condiciones superficiales. La meteorización involucra entonces, a todos los procesos que tienden a poner a las rocas y a los minerales en equilibrio con los ambientes que se encuentran en o cerca de la superficie de la tierra (Duque, 2014).

La meteorización o intemperismo es el primero de los procesos que opera en un ciclo sedimentario. Sus productos sólidos o detríticos y iónicos son la fuente principal de los materiales que como consecuencia de la erosión, transporte, depositación y precipitación pasarán a formar parte de las rocas sedimentarias, tanto clásticas o mecánicas como químicas. Los productos de la meteorización

contribuyen también a la formación de los suelos, proveen los componentes detríticos de los mismos y muchos de los nutrientes asimilados por las plantas.

La salinización de suelos y agua, es el intemperismo geoquímico permanente sobre las rocas que se encuentran en los espesores superficiales de la corteza terrestre y que tiene lugar durante todo el tiempo geológico. La mayoría de las rocas que conforman la corteza terrestre se han formado bajo condiciones de altas presiones y temperaturas. Los diferentes cristales que constituyen estas rocas, no son estables cuando estos minerales se encuentran expuestos a condiciones atmosféricas. Por lo anterior, el intemperismo es un proceso espontaneo que transforma a los minerales primarios en otros minerales más estables en la superficie de la corteza terrestre. Los agentes que están involucrados en el intemperismo geoquímico son: el agua de lluvia, el oxígeno, el bióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el ácido sulfhídrico (H_2S) (Kovda et al, 1967).

2.5.1. Intemperismo físico – desintegración

Consiste en la desintegración de las masas de rocas y de los minerales por procesos mecánicos. Los esfuerzos que conducen a la ruptura pueden provenir del interior de la masa rocosa o ser aplicados externamente. Los procesos más comunes de desintegración son el crecimiento cristalino, la insolación, el alivio de presión, y los procesos alternantes de humectación y desecación. Además, el debilitamiento de las rocas a causa de la desintegración, genera abundantes superficies a lo largo, de las cuales se vuelve más efectivo el intemperismo por procesos químicos. Los procesos más comunes de la desintegración son: crecimiento cristalino y gelifracción; desintegración por gelifracción; precipitación de sales; exfoliación por insolación; insolación, alternancia de humectación y resequedad; alivio de presión.

2.5.2. Intemperismo químico – descomposición

La meteorización química está estrechamente relacionada con el clima, ya que este regula las condiciones de temperatura y humedad que son esenciales para controlar las reacciones químicas que conducen a la descomposición de los minerales. El clima tropical caracterizado por elevadas temperaturas y disponibilidad de agua produce descomposición que son tres veces más intensos que los que ocurren en condiciones de clima templado. Los procesos más

comunes de la descomposición son: disolución simple; carbonatación, oxidación, hidratación e hidrolisis.

2.5.3. Intemperismo-biológico

Consiste en los procesos de transformación de las rocas y minerales por acción de los organismos, desde las bacterias hasta las plantas y animales. Estos procesos pueden ser de descomposición o de desintegración. Los principales procesos de meteorización biológica son: bioturbación, disolución, intercambio catiónico y quelación (Spalletti, 2007).

2.6. ANALISIS DE AGUAS

Los análisis de aguas para irrigación deben incluir el total de sales contenidas, pH, composición de aniones y cationes y el contenido de elementos minoritarios implicados.

Cationes: los cationes generalmente determinados son Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ y ocasionalmente también Cu^{2+} , Fe^{2+} , Li^+ y Mn^{2+} . Aniones: los aniones que se deben analizar son CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- y F^- . Los elementos menores como boro y silicio serán analizados ocasionalmente (kovda *et al*, 1967).

2.7. PROCESOS DE ACUMULACIÓN DE SALES

El proceso de formación dominante en las regiones húmedas tiende a acidificar los suelos en largos periodos de tiempo. Sin embargo, en las regiones de climas secos, las sales no son lavadas por las lluvias desarrollándose condiciones salinas o alcalinas por esta situación. Lo anterior se da porque el potencial de evaporación y transpiración excede a la precipitación. Así, el movimiento neto de agua en el perfil es ascendente si hay una capa freática que le aporte. Como consecuencia, las sales se acumulan sobre o cerca de la superficie en estos suelos de las regiones áridas. Existen casos de localización de sales y alcalinidad confinadas por procesos geológicos, tales como barreras al flujo de agua, intrusiones marinas o aguas marinas retenidas en valles internos que posteriormente son colmatados; como consecuencia algunas acumulaciones de

sales y alcalinidad no están necesariamente ligadas a condiciones climáticas (Zapata, 2006).

Los principales elementos y combinaciones que dan lugar a la formación de sales en suelos y aguas son Ca, Mg, Na, K, Cl, S, C, N, B y I. En menor proporción están Cu, Zn y B.

Cuadro 1. Los siguientes elementos muestran el contenido de los principales elementos en la corteza terrestre (Kovda *et al*, 1967).

Elemento	%	Elemento	%
Oxígeno	49	Potasio	2
Silicio	26	Hidrogeno	1
Aluminio	7	Titanio	0.6
Hierro	4	Carbono	0.3
Calcio	3	Cloro	0.2
Sodio	2	Fosfato	0.1
Magnesio	2	Sulfato	0.1

2.8. SOLUBILIDAD Y GEOQUÍMICA DE IONES

Todos los tipos de suelos tienen niveles específicos de fertilidad natural. Bajo idénticas condiciones climáticas estos niveles son determinados por muchos factores de las propiedades del suelo como: la roca madre o parental, condiciones físicas, químicas y bioquímicas. Particularmente la presencia de elementos móviles nutritivos de las plantas.

La mayoría de los suelos retienen mínimas cantidades de sustancias nutritivas, en contra de la lixiviación. La fertilidad de suelos puede ser incrementada por la influencia de varios factores como: cambios físicos, fisicoquímicos o biológicos que se transforman en elementos minerales nutritivos para la planta en forma más accesible (Kovda *et al*, 1967)

La formación de sales en la tierra en tiempos contemporáneos, es debido a los procesos geoquímicos, los cuales están ocurriendo ahora mismo desde tiempos

antiguos y consiste en el cambio y diferenciación de sales entre el magma, los océanos, la corteza de la tierra y la superficie de los continentes.

Cuadro 2. Máxima solubilidad en agua de algunas sales comunes encontradas en suelos a diferentes temperaturas (Kovda *et al*, 1967).

Sal	Gramos por 100 g de solución						Gramos por litro de solución					
	Temperatura en °C						Temperatura en °C					
	0	10	20	30	40	50	0	10	20	30	40	50
NaCO ₃	6.5	10.9	17.9	28.4	32.4	32.1	70	122	213	371	441	429
NaHCO ₃	6.5	7.5	8.7	10	11.3	12.7	68	80	93	107	121	137
NaSO ₄	4.3	8.3	16.1	29	32.6	31.8	45	90	185	373	430	415
NaCl	26.3	26.3	26.4	26.5	26.7	26.9	318	317	317	317	318	319
MgSO ₄	18	22	25.2	28	30.8	33.4	-	-	-	-	-	-
MgCl	38.8	39.8	41	48.6	51.8	54.5	-	-	-	-	-	-
CaCl	37.3	39.4	42.7	50.7	53.4	56	-	-	-	-	-	-
NaNO ₃	42.1	44.4	46.7	49	51.2	53.3	570	607	686	686	724	762
KNO ₃	11.6	17.5	24	31.5	39	46.1	125	194	279	384	498	614
K ₂ CO ₃	51.7	52.2	52.6	53.2	53.9	54.7	814	823	829	839	852	867
KHCO ₃	18.4	21.5	25.2	28.5	32.2	36	-	-	-	-	-	-
K ₂ SO ₄	6.7	8.5	10	11.5	12.9	14.2	71	91	108	125	142	157
KCl	21.9	23.8	25.6	27.2	28.7	3.01	253	277	301	322	341	359

2.9. SODIO

Se consideran suelos sódicos aquellos en los cuales el Na ocupa más del 15 % de la capacidad de cambio del suelo. Estos suelos tienen normalmente un pH elevado del orden de 8.5 o más. La presencia de Na en proporciones elevadas frente al Ca y al Mg, provoca la dispersión de los coloides arcillosos y húmicos originando fuerte inestabilidad estructural. Además pueden aparecer problemas de fitotoxicidad. El método oficial para la determinación del sodio intercambiable

en una muestra de suelo es mediante fotometría de llama, previa extracción con una solución de acetato amónico 1 N a pH 7 (Bascones, 2014).

Porcentaje de sodio intercambiable (PSI):

$$PSI = \frac{[Na^+]}{CIC} \times 100$$

Siendo:

[Na⁺]: la concentración de sodio en meq/100 g de suelo (1 meq de Na⁺ = 23 mg Na⁺ ⇒ 1 mg de Na⁺ / kg de suelo = 0.0043 meq/100 g suelo).

CIC: la capacidad de intercambio catiónico que nos proporciona el análisis.

La cantidad de sodio a desplazar se calculará como:

$$[Na^+]_i - [Na^+]_f = \frac{(PSI_i - PSI_f) \times CIC}{100}$$

Siendo:

PSI_i: el valor de PSI obtenido a partir del análisis de suelo.

PSI_f: el valor de PSI deseado.

2.10. POTASIO

En la fracción mineral del suelo existe potasio combinado en diferentes silicatos que forman parte de las rocas de origen magmático (feldespatos, micas, etc.) y de las arcillas. También aparece potasio en compuestos de origen sedimentario, en forma de cloruros y sulfatos que, por su menor dureza y mayor solubilidad, se meteorizan más fácilmente que los silicatos. Las formas iónicas se presentan libres en la solución del suelo, adsorbida sobre el complejo de cambio y fijada en la superficie, borde e interior de la red cristalina de determinadas arcillas. Parte de este K⁺ es fácilmente cambiabile y presenta un equilibrio dinámico con el K⁺ de la solución del suelo. El potasio difícilmente cambiabile se encuentra incluido en los espacios interlaminares de las arcillas, lo que representa una

retrogradación que depende de la naturaleza de aquellas, de los espacios interlaminares y de que éstos no estén ocupados por otros cationes. La retrogradación es máxima en suelos con arcillas expansibles del tipo 2:1 como la illita y la vermiculita. Las plantas absorben el potasio (K^+) por vía radicular a partir de la solución del suelo (1 unidad fertilizante de potasio es igual a 1 kg de K_2O). Debido a su baja carga y pequeño radio iónico, la absorción se efectúa con facilidad y pueden, incluso, absorberse cantidades de K superiores a las necesidades de la planta originando lo que se denomina consumo de lujo.

2.11. MAGNESIO

El magnesio se encuentra en el suelo principalmente en forma mineral como silicatos, carbonatos, sulfatos y cloruros. La planta puede absorber el Mg^{2+} de la solución del suelo, por vía radicular, o el de las soluciones fertilizantes, a través de los estomas, por vía foliar (1 UF = 1 kg de MgO).

Las cantidades absorbidas por las plantas cultivadas son variables, según las especies y los rendimientos de las cosechas. El conocimiento del contenido en magnesio cambiante del suelo y agua es necesario para caracterizar su capacidad para alimentar los cultivos. Sin embargo, estas cifras consideradas aisladamente no definen con precisión esta capacidad debido a los antagonismos que se presentan entre el magnesio y otros cationes. El antagonismo más frecuente es el del $Ca^{2+} \Leftrightarrow Mg^{2+}$. Valores elevados de la relación Ca/Mg pueden originar carencias magnésicas aunque el nivel de Mg^{2+} en el suelo sea aceptable. Para que esto no ocurra, la relación Ca/Mg debe mantenerse por debajo de 10. Otro antagonismo importante es el que se produce con el potasio ($K^+ \Leftrightarrow Mg^{2+}$). Cuando la relación K/Mg es superior a 3, pueden producirse carencias de magnesio en numerosos cultivos.

2.12. CALCIO

El calcio en el suelo se encuentra combinado en compuestos minerales y orgánicos. Existe además calcio iónico (Ca^{2+}) fijado sobre el complejo adsorbente o libre en la solución del suelo. En el complejo de cambio suele ser el catión más abundante.

Cantidades muy elevadas de calcio asimilable en el suelo originan problemas importantes en la fisiología de la planta por su interacción con otros macro y microelementos, como el antagonismo con el potasio que se presentan en los suelos calizos o después de fuertes encalados, donde pueden producirse carencias de potasio (Bascones, 2014).

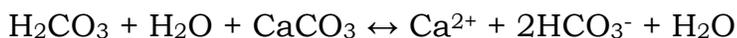
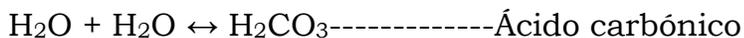
2.13. CARBONATOS

La determinación de los carbonatos del suelo y agua tiene interés por su valor de diagnóstico de diversas propiedades del suelo y agua: estructura, actividad biológica, bloqueo de nutrientes, etc. Sin embargo, el contenido total no da una idea exacta de la importancia, que los carbonatos tienen en los procesos químicos del suelo. Los suelos reciben el nombre de calizos cuando el contenido en carbonatos totales es superior al 20 %.

La caliza activa se define como la fracción de carbonatos de tamaño inferior a 50 μm . Por su gran superficie relativa es fácilmente soluble en agua cargada de CO_2 , enriqueciendo la solución en iones bicarbonato.

2.14. BICARBONATOS

Los bicarbonatos presentes en cuerpos naturales de agua dulce se originan generalmente del desgaste y disolución de rocas en la cuenca que contienen carbonatos tales como la piedra caliza. A pesar de que la piedra caliza no es muy soluble en agua pura, su disolución es promovida por la presencia de CO_2 disuelto en el agua (CO_2 atmosférico o CO_2 generado en sedimentos ricos en materia orgánica). El CO_2 reacciona con el agua para generar pequeñas cantidades de ácido carbónico, el cual disuelve entonces las rocas de carbonato en la cuenca, lo que a su vez contribuye a la alcalinidad del agua.



Roca caliza, iones disueltos (alcalinidad)

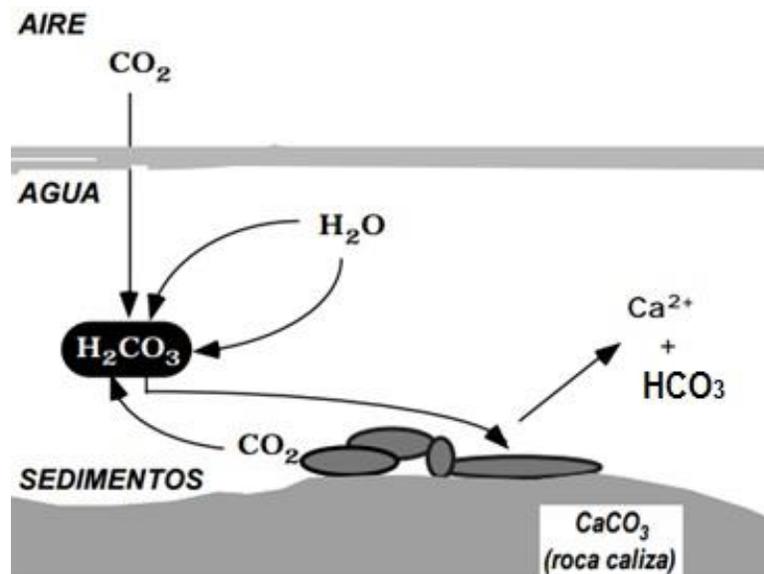


Figura 1. Origen de bicarbonatos y carbonatos en agua dulce

Lagos ubicados en regiones donde abunda la roca caliza presentan una alcalinidad alta, al igual que una capacidad amortiguadora alta. En regiones donde el lecho rocoso está compuesto mayormente de granito y otras rocas ígneas pobres en carbonatos, generalmente encontramos lagos y corrientes con una alcalinidad baja y una pobre capacidad amortiguadora. Dichos cuerpos de agua son a menudo más susceptibles al impacto de la lluvia ácida. Otras zonas donde encontramos lagos y corrientes con baja alcalinidad son áreas que reciben una precipitación abundante. En dichas áreas la mayoría de los carbonatos expuestos y disponibles se han disuelto y han sido lavados a lo largo del tiempo.

2.15. SULFATOS

Los sulfatos son la combinación de un catión más el anión $(\text{SO}_4)^{-2}$, prototipos: la anhidrita, el yeso, la calcantina, la barita y la celestina. Algunas características se explican en el (cuadro 3) son:

Cuadro 3. Ejemplos de sulfatos.

Mineral	Formula	Características
Anhidrita	CaSO ₄	Incoloro, blanco, gris, rojo o azul
Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O	Fractura concoidea y dureza 1, 5-2, 0
Barita	BaSO ₄	Bario hidrotermal
Calcantina	CuSO ₄ ·5H ₂ O	Vidrio de cobre
Celestina	SrSO ₄	Estroncio de fisuras calcáreas

Los sulfatos (SO₄)⁻² después de los bicarbonatos, son los principales aniones presentes en el agua; los cuales pueden presentarse de manera natural o como consecuencia de descargas de aguas industriales y por la utilización de fertilizantes agrícolas. Cuando los sulfatos se presentan de manera natural es posible que su origen se deba a algún depósito natural de minerales o por depositación atmosférica (Castro, 2009).

2.16. CLORO

El cloro es uno de los elementos que más abundan en el agua de riego. Éste aparece como anión cloruro (Cl⁻). El cloruro es indispensable para el desarrollo de la planta, ya que actúa en procesos vitales como la fotosíntesis, transporte de cationes, apertura y cierre de estomas y división celular. Las plantas lo requieren en pequeñas cantidades (no más de 0.5 meq/L en la solución del suelo), pero cuando su concentración es muy alta el cloruro puede convertirse en un elemento tóxico. El cloruro es absorbido por las plantas en forma activa. Su movimiento de las raíces a las hojas es rápido, siempre acompañando cationes. El cloruro se concentra sobre todo en las hojas, pero se puede encontrar en concentraciones relativamente altas en otras partes de la planta.

2.17. BORO

En los suelos y agua ácidos existe mayor cantidad de boro asimilable para las plantas, mientras que en los suelos con un alto contenido de caliza disminuye la disponibilidad del boro.

Las necesidades de boro de los cultivos suelen cubrirse mediante aplicación, al suelo o a la planta, de compuestos borados o fertilizantes con boro. Las aportaciones al suelo se hacen normalmente con bórax (Bascones, 2014).

2.18. NITRATOS

La meteorización de nitrógeno proporciona al suelo cantidades insignificantes de este elemento. Es la atmósfera terrestre, por su elevado contenido, es la auténtica fuente de N para el suelo. El paso del N atmosférico al suelo puede hacerse por vía abiótica o biótica. Este N incorporado al suelo se acumula fundamentalmente en forma orgánica. Las formas orgánicas no son asimilables directamente por las plantas, pero pueden llegar a serlo después de transformarse en nitrógeno mineral durante el proceso de mineralización de la materia orgánica.

El nitrógeno mineral del suelo se presenta en forma amoniacal (N-NH_4^+) y nítrica (N-NO_3^-). Los cultivos asimilan tanto las formas nítricas como las amoniacales, la superioridad de una u otra en la nutrición de la planta depende de la especie cultivada y de las condiciones del medio (Bascones, 2014).

2.19. FOSFATOS

El fósforo en el suelo se encuentra combinado, formando parte de diferentes fosfatos minerales y orgánicos. Se combina también con ácidos orgánicos. En la solución del suelo se presentan diferentes especies iónicas del ácido fosfórico (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} y PO_4^{3-}) dependiendo de la mayor o menor abundancia de unas u otras, del pH.

Las plantas absorben por vía radicular el fósforo de la solución del suelo, y lo hacen principalmente en forma de monoortofosfato (H_2PO_4^-), aunque en suelos con $\text{pH} \geq 7$ pueden absorberlo también como difosfato HPO_4^{2-} . Aunque la

absorción por parte de la planta se hace en forma iónica, las cantidades absorbidas se expresan en forma de P_2O_5 .

2.20. SILICIO

La fuente primaria de los materiales geológicos son las rocas ígneas, las cuales varían según su magma de origen, dando minerales distintos por su estructura y composición química, siendo las más importantes las rocas ígneas silicatadas. Los silicatos tienen una estructura tetraédrica en cuyo centro está el átomo de silicio y cuyos vértices contienen sendos átomos de oxígeno. La forma básica es SiO_4 . El oxígeno se enlaza siempre a dos silicios (uno en el centro de un tetraedro y otro en el centro de un tetraedro vecino).

Las formas adoptadas por los silicatos son múltiples. Puede haber sustituciones de silicio tetravalente por aluminio trivalente, lo que permite la entrada de otros cationes en la red para compensar esa deficiencia de carga. Los grupos (SiO_4) están a veces enlazados entre sí mediante cationes. Cada conjunto (SiO_4) forma una unidad, y cada catión separa unas unidades de otras. Estas estructuras pueden organizarse de la siguiente forma:

1- Mesosilicatos: cada unidad estructural, tetraedro, está unido por puentes, con un catión intermediario entre dos silicatos, lo que hace que la estructura sea muy débil y el mineral se altera fácilmente.

2- Sorosilicatos: la unidad fundamental son pares de tetraedros unidos por un vértice y enlazados con otros pares por cationes.

3- Ciclosilicatos: se forman tri, tetra o hexámeros de silicatos en forma de anillos, unidos entre sí por cationes. Los minerales forman estructuras complejas pero las uniones son débiles.

4- Inosilicatos: los tetraedros forman cadenas simples (píroxenos) y dobles (anfíboles); presentándose puntos de debilidad en los elementos químicos que unen las cadenas.

5- Filosilicatos: (Micas) estructura laminar donde la unión de tetraedros y octaedros es en capas superpuestas. Son estructuras complejas de difícil alteración.

6- Tectosilicatos (estructura tridimensional) y feldespatos: uniones muy fuertes y difícilmente alterables.

2.21. AGUAS SUPERFICIALES

El agua superficial es aquella que se encuentra circulando o en reposo sobre la superficie de la tierra. Estas masas de agua sobre la superficie de la tierra, forma ríos, lagos, lagunas, pantanos, charcas, humedales, y otros similares, sean naturales o artificiales. El agua superficial es la proveniente de las precipitaciones, que no se infiltra ni regresa a la atmósfera por evaporación o la que proviene de manantiales o nacimientos que se originan de las aguas subterráneas. Las aguas superficiales pueden estar fluyendo constantemente como los ríos o estar en reposo como los lagos y lagunas. El escurrimiento se da sobre la tierra debido a la gravedad y a la inclinación del terreno. Así cuando el agua cae del cielo (o se precipita, por ejemplo en forma de lluvia) la que no se infiltra, escurre en la dirección de la pendiente (hacia abajo) hasta que llega a los ríos y lagos.

Un río es una corriente natural de agua que fluye con continuidad y siempre por gravedad discurre de las partes altas hacia las bajas. Posee un caudal determinado y finalmente desemboca en el mar, en un lago o en otro río, en este último caso se le denomina afluente. Algunas veces terminan en zonas desérticas donde sus aguas se pierden por infiltración y evaporación. Cuando el río es corto y estrecho recibe el nombre de riachuelo o arroyo.

Un lago es un cuerpo de agua dulce o salada sin conexión con el mar. Es un componente más del agua superficial del planeta. Un lago es un lugar en donde el agua superficial que procede de los escurrimientos de la lluvia (y posiblemente de filtraciones del agua subterránea) se ha acumulado debido a una depresión del terreno, creada normalmente por fallas geológicas. Algunos se forman por la obstrucción de valles debido a desplomes en sus laderas. Otros lagos son de origen volcánico. En un lago las velocidades del río disminuyen, y por consiguiente se produce sedimentación, evaporación e infiltración. Dependiendo de las dimensiones del lago, su forma y profundidad especialmente, se producirán corrientes, tanto horizontales como verticales que le darán sus características especiales como ecosistemas. La mayoría de los lagos generalmente tiene un río de entrada y otro de salida. En algunos casos

especiales, la salida superficial no existe (lago de Atitlán) y a este tipo de cuenca se le conoce como endorreica (USGS. EPA, 2004).

2.22. CALIDAD DEL AGUA EN LA AGRICULTURA

La agricultura de riego depende de un suministro adecuado de agua de calidad utilizable. El uso intensivo de insumos, casi todos de buena calidad significa que los nuevos proyectos de riego y viejos proyectos que buscan suministros nuevos o complementarios deben depender de menor calidad y fuentes menos deseables. Para evitar problemas al utilizar estos suministros de agua de calidad pobre, tiene que haber una buena planificación para asegurar que la calidad del agua disponible se ponga a la mejor utilización.

La calidad del agua se refiere a las características de un suministro de agua que va a influir en su idoneidad para un uso específico, es decir, qué tan bien la calidad cumple con las necesidades del usuario. La calidad se define por una o más características físicas, químicas y biológicas. Preferencias personales, como el gusto es una simple evaluación de la aceptabilidad. Por ejemplo, si dos aguas potables de la misma calidad están disponibles, las personas pueden expresar su preferencia por un suministro en lugar de la otra; el agua de mejor sabor se convierte en el suministro preferido. En la evaluación del agua de riego, se hace hincapié en las características químicas y físicas del agua.

Los usos específicos tienen necesidades diferentes de calidad y de suministro de agua. Así se considera más aceptable (de mejor calidad) si produce mejores resultados o causa menos problemas que un suministro alternativo de agua. Por ejemplo, agua de río de buena calidad que puede ser utilizada con éxito para el riego puede contener en su carga sedimentos, que serían inaceptables para uso municipal sin tratamiento. Del mismo modo, el agua del deshielo de excelente calidad para uso municipal puede ser demasiado corrosiva para uso industrial sin tratamiento para reducir su potencial de corrosión.

La predicción de que se produzca un problema relacionado con la calidad del agua requiere una evaluación del potencial del agua, para crear las condiciones del suelo que pueden restringir su uso o que puedan requerir el uso de técnicas especiales de manejo, para mantener rendimientos aceptables.

Las cuatro categorías de problemas del agua: la salinidad, la infiltración, la toxicidad y diversos se utilizan para la evaluación de la calidad del agua, sin embargo, son a menudo complejas y una combinación de problemas pueden afectar a la producción de cultivos con mayor severidad que un solo problema de manera aislada. Cuanto más complejo es el problema, más difícil es la formulación de un programa de gestión económica para la solución.

Las directrices tienen un carácter práctico y se han utilizado con éxito en la agricultura de riego, en general para la evaluación de los componentes comunes en las aguas superficiales, aguas subterráneas y aguas de drenaje (Ayers & Westcot, 1987).

2.23. SALINIDAD EN LAS AGUAS DE RIEGO

El problema de degradación de la tierra que ha tenido que enfrentar el hombre, ha sido el de controlar, prevenir o mejorar los suelos afectados por la salinidad. En las regiones áridas, semi áridas y estepas, donde la evaporación es mayor que las precipitaciones, se ubican las regiones más afectadas por sales. También puede aparecer en lugares con prolongados periodos de sequía, como en zonas climáticas templadas, secas y trópicos secos. Otros lugares donde es posible encontrar suelos con problemas, son los cercanos al mar (costas, lagunas, litorales y pantanos), o bien en la cercanía de domos salinos, manantiales de aguas salinas y mantos freáticos salinos (Otero et al; 2007).

2.24. EFECTO DE LAS SALES EN LOS CULTIVOS

Las plantas extraen agua del suelo ejerciendo una fuerza de absorción mayor que la que contiene el agua en la tierra. Si la planta no puede hacer el ajuste interno suficiente y ejercer suficiente fuerza, no es capaz de extraer agua suficiente y sufrirá estrés hídrico. Esto ocurre cuando el suelo se vuelve demasiado seco. La sal en el suelo-agua aumenta la fuerza de la planta, que debe ejercer para extraer el agua y esta fuerza adicional se conoce como el efecto osmótico o potencial osmótico.

Por ejemplo, si dos suelos idénticos con agua, uno libre de sal y el otro con sal, la planta puede extraer y utilizar más agua de la tierra libre de sal que desde el

suelo salado. Las razones no se explican fácilmente. Las sales tienen una afinidad para el agua. Si el agua contiene sal, más energía por unidad de agua debe ser gastada por la planta, para poder absorber agua libre de sal a partir de una solución de agua en el suelo relativamente salada.

Para todos los efectos prácticos, la energía añadida necesaria para absorber agua del suelo salado (potencial osmótico) es aditivo a la energía necesaria para absorber el agua (potencial de agua del suelo) sin sal del suelo. El efecto es una importante reducción en el agua disponible para el cultivo, a medida que aumenta la salinidad. Los efectos de la salinidad están estrechamente relacionados a los de la sequía, tanto como estrés hídrico y de crecimiento reducido. Los efectos en la planta son el retraso del crecimiento, daños en las hojas y necrosis o lesión obvia a la planta (Ayers & Westcot, 1987).

A medida que el suelo se seca, la planta también se expone a una disponibilidad de agua que cambian continuamente en cada porción de la profundidad de las raíces ya que el contenido de agua del suelo (potencial de agua del suelo) y la salinidad del agua del suelo (potencial osmótico) cambian a medida que la planta utiliza el agua entre riegos. La planta absorbe el agua, pero la mayor parte de la sal se excluye.

2.25. PELIGRO DE SALINIDAD

Existen problemas cuando las sales solubles se acumulan en la zona radical de los cultivos, hasta niveles o concentraciones que causan pérdidas de rendimiento. Las sales que contribuyen a generar un problema de salinización son siempre sales solubles y por lo tanto, fácilmente de transportar por el agua. Como el agua es el principal transporte, su acumulación en la zona radical se produce por aporte directo del agua de riego o a partir del ascenso desde capas freáticas cercanas a la superficie, este último proceso que se conoce como salinización secundaria, es común en las regiones áridas y semiáridas y requiere un excelente manejo del riego (Prieto, 2008).

De acuerdo a la salinidad que presenta (Richards, 1982):

Aguas de baja salinidad (C1): pueden usarse para riego en la mayoría de los cultivos y en casi cualquier tipo de suelo con poca probabilidad de que se

desarrolle la salinidad. Se necesita algún lavado, pero este se logra en condiciones normales de riego, excepto en suelos de muy baja permeabilidad.

Aguas de salinidad media (C2): puede usarse siempre y cuando se tenga un grado moderado de lavado. En casi todos los casos y sin necesidad de prácticas especiales de control de la salinidad, se pueden producir plantas moderadamente tolerantes a las sales.

Aguas altamente salinas (C3): No pueden usarse en los suelos cuyo drenaje sea deficiente. Aun con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales de control de la salinidad. Consecuentemente si se utiliza para riego, se deben seleccionar especies vegetales muy tolerantes a las sales.

Aguas muy altamente salinas (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.

2.26. SALINIDAD EFECTIVA

Es una estimación más real del peligro que presentan las sales solubles del agua de riego cuando pasan a formar parte de la solución del suelo (Díaz *et al*; 2005). Tomando en cuenta la precipitación de las sales menos solubles, como el carbonato de calcio y el carbonato de magnesio, así como el sulfato de calcio (Donnen, 1975). Se puede calcular de la siguiente manera:

1. Si $Ca^{+2} > CO_3^{-2} + HCO_3^{-} + SO_4^{-2}$, entonces: $SE = \text{Suma de cationes}^* - (CO_3^{-2} + HCO_3^{-} + SO_4^{-2})$
2. Si $Ca^{+2} < CO_3^{-2} + HCO_3^{-} + SO_4^{-2}$; pero $Ca^{+2} > CO_3^{-2} + HCO_3^{-}$; entonces: $SE = \text{Suma de cationes}^* - Ca^{+2}$
3. Si $Ca^{+2} < CO_3^{-2} + HCO_3^{-}$; pero $Ca^{+2} + Mg^{+2} > CO_3^{-2} + HCO_3^{-}$; entonces: $SE = \text{Suma de cationes}^* - (CO_3^{-2} + HCO_3^{-})$
4. Si $Ca^{+2} + Mg^{+2} < HCO_3^{-}$; entonces $SE = \text{Suma de cationes}^* - (Ca^{+2} + Mg^{+2})$

Todos los iones se expresan en meq L⁻¹. *Se usa la suma mayor de aniones y cationes.

Cuadro 4. Clasificación de agua en base a la salinidad efectiva.

Clase	Salinidad efectiva en meq L⁻¹
Buena	< 3
Condicionada	De 3 a 15
No recomendable	> 15

2.27. SALINIDAD POTENCIAL

El índice de salinidad potencial (SP) es un indicador para estimar el peligro de las sales que quedan en solución a bajos niveles de humedad. Los carbonatos y sulfatos de calcio, precipitan fácilmente cuando el agua de riego pasa a formar parte de la solución del suelo, dejando de participar en la elevación de la presión osmótica (Coras, 1996). La (SP) se mide en meq L⁻¹ y se calcula mediante la fórmula siguiente (Doneen, 1961):

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

Cuadro 5. Clasificación de aguas con respecto a la salinidad potencial.

Clase	Salinidad potencial meq L⁻¹
Buena	< 3
Condicionada	De 3 a 15
No recomendable	> 15

2.28. PRESIÓN OSMÓTICA

La concentración iónica total y consiguiente presión osmótica es una característica de gran importancia en la solución nutritiva, ya que una alta presión osmótica disminuye la energía libre del agua y, por lo tanto, restringe la absorción de agua y algunos nutrimentos, se requiere una mayor cantidad de energía para llevar a cabo este proceso fisiológico. Uno de los procesos fisiológicos más sensibles al déficit hídrico es el crecimiento celular, se reduce la expansión celular y el área foliar. Como resultado ocurre una disminución en el crecimiento de las plántulas. Esta disminución se debe en parte al aumento en el gasto de energía realizado por la planta, para adquirir el agua y realizar el aporte bioquímico para sobrevivir, se desvía energía que debería ser utilizada para los procesos asociados al crecimiento y rendimiento, incluyendo elongación celular, síntesis de metabolitos y componentes celulares (Preciado, 2003).

La presión osmótica de una solución es equivalente a la presión real que se desarrolla en un sistema osmótico y es equivalente a el potencial osmótico en concepto, pero de signo opuesto, el potencial es expresado en términos de energía y la presión osmótica en términos de presión (Flores *et al.*, 2005).

Al aumentar la concentración de la solución, la presión osmótica también aumenta, el punto de congelación desciende, la presión de vapor disminuye y el punto de ebullición aumenta, se le conoce como propiedad coligativa de las soluciones (Larqué y Trejo, 1990). La presión osmótica es la fuerza que debe aplicarse para contrarrestar el movimiento del agua hacia el sitio en donde existe mayor cantidad de solutos (Larqué, 1980).

Para el cálculo de la presión osmótica se usa la siguiente ecuación de la ley de Boyle, la ley de Charles y la ley de Avogadro.

$$PV = nRT$$

Donde:

P: Es la presión osmótica

V: Volumen ocupado por el gas, 1 L mol^{-1}

n: Es la cantidad de sustancia en moles

R: Constante general de los gases 8.314511984 (J/mol k)

T: Temperatura absoluta expresada en grados kelvin

Se propone la siguiente fórmula para el cálculo de la presión osmótica según (Richards, 1973).

$$PO = 0.36 CE$$

Donde:

PO= presión osmótica

CE= conductividad eléctrica (mmhos/cm⁻¹)

Podemos establecer una igualdad entre el total de sólidos disueltos (TSD) y la conductividad eléctrica CE y TSD, para poder calcular mejor la presión osmótica.

$$PO = (TSD * 0.36) / 640$$

Donde:

PO: Presión osmótica (atm)

CE= Conductividad eléctrica (dS m⁻¹)

TSD= Total de sólidos disueltos (mg L⁻¹)

2.29. SODICIDAD EN LAS AGUAS DE RIEGO

Cuando el Na⁺ es el catión dominante se produce la dispersión de las arcillas, lo que lleva a una destrucción de la estructura. Además de que la hidrólisis de las arcillas sódicas, conduce a la alcalinización del perfil, y estas provocan una intensa alteración mineral, reflejándose en un perfil bien diferenciado desde el punto de vista morfológico. A estos suelos se les llama suelos sódicos o en ocasiones alcalinos y su clase representativa es el solonetz, que son suelos con un horizonte subsuperficial arcilloso denso, fuertemente compactado, que tiene una proporción elevada de iones Na⁺ y/o Mg²⁺ adsorbidos (IUSS, 2007).

La salinización y sodificación de los suelos agrícolas son quizás los problemas más serios que enfrenta la agricultura en nuestros días. La aceleración de estos

procesos se debe a la intensificación global de la desertificación, a la aplicación indiscriminada del agua para riego en zonas cercanas al mar y a la introducción masiva de sistemas de riego, sin asegurar que el destino final del drenaje sea el mar. Estos procesos provocan una disminución en el desarrollo y la producción de varios cultivos (Mata *et al*, 2014).

Los suelos normalmente toman las sales de mantos freáticos superficiales, los cuales suelen poseer sales disueltas en menor o mayor proporción. La existencia de estos mantos freáticos es frecuente en las depresiones y tierras bajas. En las regiones áridas, las sales pueden ascender por capilaridad. El viento, en las zonas, áridas arrastra gran cantidad de partículas en suspensión, tales como, carbonatos, sulfatos y cloruros, depositándose en los suelos. No obstante, las aguas subterráneas empleadas para la irrigación contienen sales solubles como el sodio, calcio, magnesio, potasio, sulfatos y cloruros disueltos de las rocas y minerales. La evapotranspiración del agua de riego, finalmente hacen que se acumulen en los suelos cantidades excesivas de sales, salvo que exista una lixiviación y un drenaje adecuados. Este proceso se denomina salinización por irrigación (Smith y Smith 2007).

La sodicidad, tiene que ver con un incremento del contenido de sales en los suelos, que provoca, entre otras cosas, la disminución del rendimiento de los cultivos. Estos procesos en los suelos, se pueden determinar con base en su porcentaje de sodio intercambiable (PSI), midiendo la conductividad eléctrica en el extracto de saturación y evaluando su basicidad mediante su pH. (SEMARNAT, 2009). En los suelos ocurre cuando el complejo coloidal está ocupado principalmente con sodio (Na^+), provocando una dispersión de los coloides del suelo, que lo hacen mucho menos permeable y se determina, cuando el porcentaje de sodio intercambiable es mayor de 15 y la conductividad del extracto de saturación es menor de 4 dSm^{-1} a 25°C (Richards 1982).

Los suelos sódicos tienen un porcentaje de sodio intercambiable (PSI) mayor a 1.2 este sodio no es dañino para las plantas, pero causa que los suelos de textura fina sean extremadamente impermeables al agua y dificulta la penetración de las raíces. Además los suelos son muy compactos, húmedos y pegajosos; formando columnas de suelo con capas redondeadas. Los efectos de la sodicidad, perjudican principalmente, el desarrollo de la vegetación y el rendimiento de los cultivos (Basurto *et al*, 2008).

Las aguas se clasifican utilizando la relación de adsorción de sodio (RAS). Esta clasificación de las aguas de riego, se basa principalmente en el efecto que tiene el ion sodio adsorbido, sobre las condiciones físicas de los suelos. En la (figura 2) se ejemplifica una gráfica de clasificación de la RAS (Mancilla, 2012).

a. Aguas bajas en sodio (S1). Pueden utilizarse para riego agrícola en la mayoría de los suelos, con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. Aunque no obstante, los cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

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

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

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

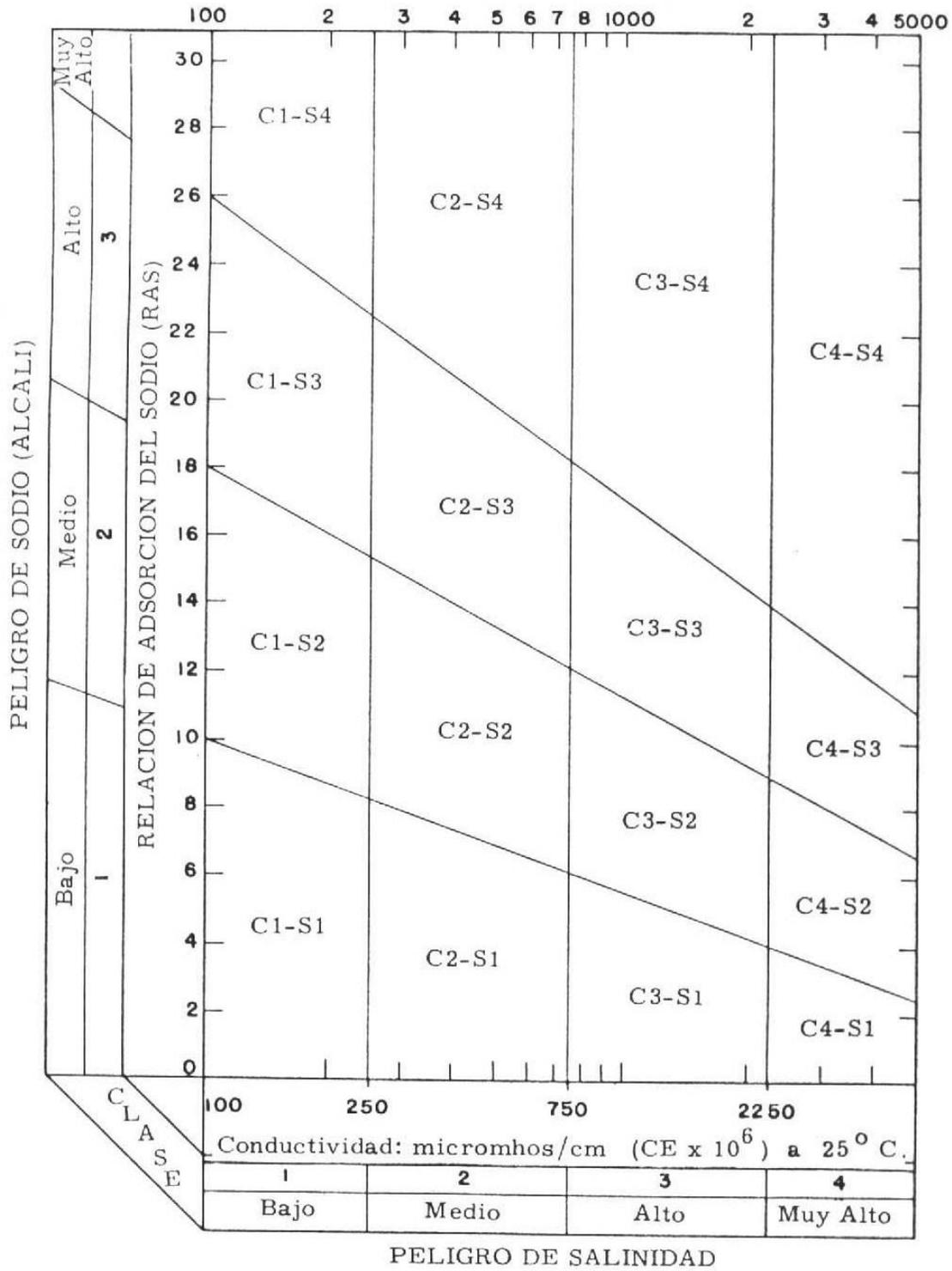


Figura 2. Diagrama de clasificación de aguas propuesto por (Richards 1982).

2.30. RELACIÓN ADSORCIÓN DE SODIO ORIGINAL

La RAS de una determinada agua de riego, puede ser usada como medida de peligro de sodicidad de esta agua, cuando se tuviesen condiciones ideales de equilibrio. Sin embargo, uno de los mayores factores que afectan los valores del RAS final de agua del suelo, es la pérdida o ganancia en contenidos de calcio y de magnesio debido a la precipitación o disolución de carbonatos alcalino-térreos (Amrhein y Suarez, 1991).

La relación de adsorción de sodio (RAS) original, es calculado mediante la siguiente formula expresado en (meq L⁻¹):

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

Dónde:

RAS: es la relación de adsorción de sodio, en todos los casos (meq L⁻¹)

Na⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺: corresponde a la concentración (meq L⁻¹).

2.31. RELACIÓN DE ADSORCION DE SODIO AJUSTADO

Lo recomendado para el cálculo de la RAS es el propuesto por (Bower, 1968), el cual ajusta la concentración de calcio en el agua, al valor de equilibrio esperado después del riego, e incluye, además, los efectos del bióxido de carbono (CO₂), el bicarbonato (HCO₃⁻) y la salinidad sobre el calcio originalmente contenido en el agua de riego mediante:

$$RASaj = \frac{Na}{\frac{\sqrt{Ca + Mg}}{2}} [1 + (8.4 - pHc)]$$

Dónde:

RASaj: es la relación de adsorción de sodio ajustado, bajo condiciones de alcalinidad.

pHc: es el pH calculado a partir de la fuerza iónica y la concentración de Ca^{2+} y $(\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$.

Para estimar la precipitación del carbonato de calcio (CaCO_3) cuando alcanza su límite de saturación en presencia de iones bicarbonato, se utiliza el índice de saturación propuesto por (Langelier, 1936):

$$\text{IS} = \text{pHa} - \text{pHc}$$

Donde:

pHa= es el pH actual del agua

pHc= del agua en equilibrio con CaCO_3

IS = (+) el agua precipita CaCO_3

IS = (-) el agua disuelve CaCO_3

El pHc se calcula como sigue (Bower *et al*, 1968):

$$\text{pHc} = (\text{pk}'_2 - \text{pk}'_c) + \text{pCa} + \text{pAlk}$$

Donde:

$\text{pk}'_2 - \text{pk}'_c$ = son los logaritmos negativos de segunda constante de disociación del ácido carbónico (H_2CO_3) y la constante de solubilidad del carbonato de calcio (CaCO_3), ambos corregidos por su fuerza iónica (I).

pCa: es el logaritmo negativo de la concentración molar de calcio.

p(Alk): corresponde al logaritmo negativo de la concentración equivalente de CO_3^{2-} y HCO_3^-

El $(\text{pK}_2' - \text{pK}_c')$ se obtiene mediante la siguiente ecuación matemática:

$$\text{pK}_2 - \text{pK}_c = 2.0269 + \left[0.5092 \left(\frac{4.0\sqrt{\mu}}{1 + 2.0\sqrt{\mu}} + \frac{\sqrt{\mu}}{1.0 + 1.45\sqrt{\mu}} \right) \right]$$

Dónde:

2.0269 es la diferencia entre $(\text{pK}_2' - \text{pK}_c')$: $\text{K}_2 = 4.7 \times 10^{-11}$ y $\text{K}_c = 5.0 \times 10^{-9}$

μ : es la fuerza iónica y está relacionada con la concentración total de cationes (C en meq L^{-1}), la ecuación de regresión es la siguiente:

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

Cuadro 6. Calculo de los valores de pHc teórico.

mmol_e L⁻¹	pK₂ - pKc	pCa	pAlk	mmol_e L⁻¹	pK₂ - pKc	pCa	pAlk
0.1	2.090	4.301	4.000	35	2.421	1.757	1.456
0.2	2.096	4.000	3.699	36	2.425	1.745	1.444
0.3	2.101	3.824	3.523	37	2.429	1.733	1.432
0.4	2.106	3.699	3.398	38	2.433	1.721	1.420
0.5	2.110	3.602	3.301	39	2.436	1.710	1.409
0.6	2.114	3.523	3.222	40	2.440	1.699	1.398
0.7	2.118	3.456	3.155	41	2.443	1.688	1.387
0.8	2.122	3.398	3.097	42	2.447	1.678	1.377
0.9	2.126	3.347	3.046	43	2.450	1.668	1.367
1.0	2.129	3.301	3.000	44	2.453	1.658	1.357
2.0	2.158	3.000	2.699	45	2.457	1.648	1.347
3.0	2.180	2.824	2.523	46	2.460	1.638	1.337
4.0	2.198	2.699	2.398	47	2.463	1.629	1.328
5.0	2.214	2.602	2.301	48	2.466	1.620	1.319
6.0	2.228	2.523	2.222	49	2.469	1.611	1.310
7.0	2.241	2.456	2.155	50	2.472	1.602	1.301
8.0	2.253	2.398	2.097	51	2.475	1.594	1.292
9.0	2.263	2.347	2.046	52	2.478	1.585	1.284
10	2.273	2.301	2.000	53	2.481	1.577	1.276
11	2.283	2.260	1.959	54	2.484	1.569	1.268
12	2.292	2.222	1.921	55	2.486	1.561	1.260
13	2.300	2.187	1.886	56	2.489	1.553	1.252
14	2.308	2.155	1.854	57	2.492	1.545	1.244
15	2.315	2.125	1.824	58	2.495	1.538	1.237
16	2.323	2.097	1.796	59	2.497	1.530	1.229
17	2.330	2.071	1.770	60	2.500	1.523	1.222
18	2.336	2.046	1.745	61	2.502	1.516	1.215
19	2.342	2.022	1.721	62	2.505	1.509	1.208
20	2.349	2.000	1.699	63	2.507	1.502	1.201
21	2.355	1.979	1.678	64	2.510	1.495	1.194
22	2.360	1.959	1.658	65	2.512	1.488	1.187
23	2.366	1.939	1.638	66	2.514	1.482	1.181
24	2.371	1.921	1.620	67	2.517	1.475	1.174
25	2.376	1.903	1.602	68	2.519	1.469	1.168
26	2.381	1.886	1.585	69	2.521	1.462	1.161
27	2.386	1.870	1.569	70	2.524	1.456	1.155
28	2.391	1.854	1.553	71	2.526	1.450	1.149
29	2.396	1.839	1.538	72	2.528	1.444	1.143
30	2.400	1.824	1.523	73	2.530	1.438	1.137
31	2.404	1.810	1.509	74	2.532	1.432	1.131
32	2.409	1.796	1.495	75	2.534	1.426	1.125
33	2.413	1.783	1.482	76	2.537	1.420	1.119
34	2.417	1.770	1.469	77	2.539	1.415	1.114

...cuadro 6

mmol _c L ⁻¹	pK ₂ - pK _c	pCa	pAlk	mmol _c L ⁻¹	pK ₂ - pK _c	pCa	pAlk
78	2.541	1.409	1.108	90	2.564	1.347	1.046
79	2.543	1.403	1.102	91	2.565	1.342	1.041
80	2.545	1.398	1.097	92	2.567	1.337	1.036
81	2.547	1.393	1.092	93	2.569	1.333	1.032
82	2.549	1.387	1.086	94	2.571	1.328	1.027
83	2.551	1.382	1.081	95	2.572	1.323	1.022
84	2.553	1.377	1.076	96	2.574	1.319	1.018
85	2.554	1.372	1.071	97	2.576	1.314	1.013
86	2.556	1.367	1.066	98	2.577	1.310	1.009
87	2.558	1.362	1.061	99	2.579	1.305	1.004
88	2.560	1.357	1.056	100	2.580	1.301	1.000
89	2.562	1.352	1.051				

2.32. RELACION ADSORCION DE SODIO CORREGIDO

La RAS corregido fue propuesto por Suárez (1981) donde toma en cuenta la concentración de los iones de calcio que llamó (RAS°), cuando este valor se introduce en la fórmula del RAS. Este autor señala que la presión parcial del bióxido de carbono CO₂ del aire en los primeros milímetros del suelo debe tomarse en cuenta. Y propone que la presión parcial del bióxido de carbono debe ser de 0.0007 atmósferas ó 0.07 kPa.

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

Dónde:

RAS°: es la relación de adsorción de sodio que considera la precipitación de Ca²⁺ en el agua.

Ca°: es la concentración de calcio en el agua, corregido.

Na⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻/Ca²⁺: Concentración expresada en meq/L⁻¹

Cuadro 7. Valores de la concentración de Ca° en el agua.

HCO₃⁻ Ca⁺²	Salinidad del agua de riego aplicada CE mS cm⁻¹											
	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1	1.5	2	3	4	6	8
0.05	13.2	13.61	13.92	14.4	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
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
10.0	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43	0.45	0.47	0.48	0.51	0.53	0.56	0.58
20.0	0.24	0.25	0.26	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.32	0.33	0.35	0.37
30.0	0.18	0.19	0.20	0.20	0.21	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.27	0.28

2.33. PORCIENTO 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.

El porcentaje de sodio intercambiable (PSI) se utiliza para conocer en que niveles el ion sodio se adsorbe, cuando una determinada agua de riego se encuentra en condiciones de equilibrio, con un espesor de suelo determinado. 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 (Can, 2011). El PSI significa el porcentaje de cargas negativas utilizadas u ocupadas con iones de sodio mediante la ecuación propuesta por (Richards, 1982):

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

2.34. TOXICIDAD DEL AGUA

La toxicidad normalmente se produce cuando ciertos iones se absorben en el suelo-agua y se acumulan en las hojas durante la transpiración de agua a un grado que resulta en daño a la planta. El grado de daño depende del tiempo, la concentración, la sensibilidad de los cultivos y el uso del agua en los cultivos. Si el daño es lo suficientemente grave, el rendimiento del cultivo se reduce. Los iones tóxicos habituales en el agua de riego son el cloruro, el sodio y el boro. El daño puede ser causado por cada uno, individualmente o en combinación.

No todos los cultivos son sensibles a estos iones tóxicos. La mayoría de los cultivos anuales no son sensibles, pero la mayoría de los cultivos de árboles y plantas de tipo perenne leñosas sí lo son. Los síntomas de toxicidad pueden aparecer en casi cualquier cultivo si las concentraciones son suficientemente elevadas. La toxicidad a menudo complica el problema de la salinidad o la infiltración aunque puede aparecer incluso cuando la salinidad es baja.

Los iones sodio y cloruro, pueden ser absorbidos directamente en la planta a través de las hojas humedecidas durante los riegos por aspersión. Esto ocurre generalmente durante los períodos de alta temperatura y baja humedad. La absorción de la hoja acelera la tasa de acumulación de un ion tóxico y puede ser una fuente principal de la toxicidad.

Muchos elementos además del sodio, cloruro y boro, son tóxicos para las plantas a concentraciones muy bajas. La mayoría de los suministros de riego contienen concentraciones muy bajas de estos oligoelementos y generalmente no son problema (Ayers & Westcot, 1987).

Cuadro 8. Tolerancia relativa de algunos cultivos a sales, cuando se usa riego por aspersión (maas, 1984).

Concentración de Na⁺ o Cl⁻ (meq L⁻¹) que puede causar daño foliar			
	5-10	10-20	Más de 20
	Vid	Alfalfa	Coliflor
Cultivos	Pimienta	Cebada	Algodón
	Papa	Maíz	Remolacha
	Tomate	Pepino	Girasol

2.35. PROBLEMAS DE INFILTRACIÓN DEL AGUA

Este problema se presenta, cuando la infiltración del agua de riego no entra en el suelo lo suficientemente rápido, durante un ciclo de riego normal, como para no permitir la renovación del agua consumida por el cultivo entre dos riegos. La infiltración reducida, es debido a la calidad del agua aplicada y generalmente en un problema dentro de los pocos centímetros superiores del suelo, pero en ocasiones puede ocurrir a mayores profundidades. El resultado final es una disminución en el suministro de agua a la cosecha, similar a la reducción debido a la salinidad. Un problema de infiltración de agua, reduce la cantidad de agua en el suelo para su uso posterior, mientras que la salinidad reduce la disponibilidad de agua en el almacenamiento. La infiltración se refiere a la entrada de agua en la superficie del suelo. Y se mide en términos de velocidad.

Una tasa de infiltración por debajo de 3 mm/hora se considera baja, mientras que por encima de 12 mm/hora es relativamente alto. La tasa de infiltración puede verse afectada por factores distintos de la calidad del agua, como también por características físicas del suelo.

La tasa de infiltración generalmente aumenta con el aumento de la salinidad y disminuye con la disminución de la salinidad, como también disminuye con el aumento del contenido de sodio en relación con el calcio y el magnesio.

La salinidad del agua inferior a menos de 0.5 dS/m y especialmente por debajo de 0.2 dS/m) es corrosiva y tiende a lixiviar suelos de superficies libres de minerales solubles y sales, especialmente de calcio, reduciendo su fuerte influencia estabilizadora sobre los agregados del suelo y la estructura del suelo. Sin sales y sin calcio, en el suelo se dispersan las partículas más finas, se llenan muchos de los espacios de los poros más pequeños, sellando la superficie y reduciendo en gran medida la velocidad a la cual el agua se infiltra en la superficie del suelo. Se presentan problemas de encostramiento en el suelo y daño del cultivo, además de una reducción en la cantidad de agua que va a entrar en el suelo, en una determinada cantidad de tiempo y que en última instancia puede causar estrés hídrico.

El exceso de sodio en el agua de riego promueve la dispersión del suelo y la descomposición estructural, pero sólo si excede en relación sodio-calcio en más de 3:1. Este contenido elevado de sodio (> 3:1) a menudo resulta en un problema grave de infiltración de agua. Esto es debido a la falta de calcio suficiente para contrarrestar los efectos de dispersión de las sales de sodio.

El sodio en exceso también puede hacer que sea extremadamente difícil satisfacer la demanda de agua de los cultivos. Otros problemas relacionados, tales como la

formación de costras del suelo, la mala emergencia de las plántulas, la falta de aireación de plantas y raíces, las malas hierbas y los problemas de control de mosquitos, causadas por la baja tasa de infiltración, pueden complicar aún más el manejo del cultivo.

2.36. CARBONATO DE SODIO RESIDUAL

El índice de carbonato residual (CSR) indica el peligro de sodificación, una vez precipitados los carbonatos y bicarbonatos de calcio y de magnesio. El riesgo se reduce eliminando los carbonatos y bicarbonatos con tratamiento ácido, su eliminación es indispensable en sistemas de fertirrigación debido a que producen taponamiento en los emisores. El (CSR) se calcula mediante la fórmula:

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

Valores expresados en (meq L⁻¹).

Cuando el valor de (CSR) es menor de 1.25 meq L⁻¹ no existe problema, si el valor de (CSR) es mayor de 1.25 meq L⁻¹ indica tendencia a la precipitación de Ca²⁺ y Mg²⁺ como carbonatos. El agua cuyo índice de (CSR) sea superior a 2.5 meq L⁻¹ no es recomendada para su uso en sistemas de riego, esto debido al riesgo de precipitación de carbonatos de calcio y magnesio. Cuando ocurre dicha precipitación, quedan solamente sales de sodio en la solución y los valores de RAS se incrementan (Pérez, 2014).

El índice de (CSR) es para evaluar el agua cuando la concentración de CO₃²⁻ y HCO₃⁻ sea mayor que la concentración de Ca²⁺ y Mg²⁺. Si la concentración de Ca²⁺ y Mg²⁺ es mayor que la de HCO₃⁻ ocurrirá precipitación de CaMg(CO₃)₂ lo cual, da como resultado el incremento en el porcentaje de sodio en la solución del suelo, según la siguiente expresión matemática:

$$\text{PSP} = (\text{Na}^+ \times 100) / [(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+) - (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)]$$

2.37. CUENCA DEL ORIENTAL

La cuenca del Oriental (18°57'19"44' N, 97°10' 98"05' W) se localiza, por sus características fisiográficas, en los lagos y volcanes del Anáhuac. De acuerdo a las agrupaciones de topofomas la zona se divide en trece sistemas terrestres o ecogeográficos: Huilapitzo, Tlaxco, Perote-Tepeaca-Molcaxac, Huamantla, San José Chiapa, San Salvador El Seco, Tlaxcala, La Malinche, Cofre de Perote-Citlaltépetl, Teziutlan-Xiutetelco; Chalchicomula, Las Derrumbadas y Soltepec. La superficie total de la cuenca Oriental es de 4 981 747 km².

La interacción de la latitud y la altitud de la cuenca Oriental resulta en la presencia de los siguientes cinco tipos de clima de acuerdo con el sistema de clasificación de Köppen, para las condiciones de México: BS1 (seco estepario semiárido), C(W1) (templado subhúmedo con lluvias en verano), C(W2) (templado subhúmedo con lluvias en verano), ETH (frío) y EFH (muy frío).

La geología de la cuenca Oriental forma parte de la provincia lagos y volcanes del Anáhuac, que a su vez se encuentra incluida en el Eje Neovolcánico Transversal. Este último es una franja de rocas volcánicas de diversos tipos y texturas, emitidas sucesivamente por numerosos volcanes durante el Cenozoico; actualmente estas rocas constituyen un extenso bloque superpuesto a las rocas del Mesozoico que atraviesan la República Mexicana en dirección este-oeste. En la cuenca Oriental destacan dos de los estrato-volcanes más altos del país, el Pico de Orizaba o Citlaltépetl con altitud de 5610 m y La Malinche con altitud de 4461 m, y dos lagunas someras Tepeyahualco y Totolcingo, producto del afloramiento del acuífero subterráneo y de las precipitaciones pluviales (Cruickshank, 1992). También se presentan como un rasgo característico de la cuenca, seis conos de explosión freatomagmática cuyo fondo está ocupado por agua, que reciben el nombre local de axalapascos; éstos son los lagos-cráter (maars) Alchichica, Quechulac, Atexcac, La Preciosa, Aljojuca y Tecuitlapa.

La hidrología superficial de la cuenca del Oriental es endorreica, en la que los escurrimientos de agua captada por precipitación no fluyen al mar ni a otra cuenca, sino que por un lado se acumulan en el manto freático y por el otro se evaporan. Cuenta con una superficie aproximada de 4982 km² y es reconocida con el nombre de subcuenca de la laguna de Totolcingo, perteneciente a la cuenca del río Atoyac, dentro de la región hidrológica número 18 del río Balsas.

El sistema hidrológico superficial es prácticamente inexistente debido a que la mayor parte de la superficie de la cuenca presenta depósitos piroclásticos de edad reciente que favorecen una alta infiltración. Por lo tanto y conjuntamente con el hecho de que la época de lluvias tiene una estacionalidad muy marcada y breve, en la cuenca no existen escurrimientos superficiales perennes. Los escurrimientos de temporal en la cuenca son arroyos pequeños limitados a la ladera occidental de la sierra Cofre de Perote-Pico de Orizaba y a las laderas oriental y norte del volcán La Malinche. Los arroyos se asocian a abanicos aluviales en las laderas de estos volcanes.

Existen manantiales en las partes altas de los tres volcanes y en el cerro San Gabriel, así como en El Carmen, en las cercanías de la estación Los Manantiales y cerca de Ciudad Serdán. Asimismo se presenta un manantial de aguas termales (92°C) ubicado en Libres, Puebla.

En la parte central de la cuenca, que corresponde a la altitud más baja, se forman dos lagunas someras, la laguna de Totolcingo (El Carmen) y la laguna de Tepeyahualco (El Seco).

La hidrología subterránea de la cuenca del Oriental, es como un área almacenadora de agua subterránea, estriba en el hecho de que 40% de ésta presenta materiales consolidados de alta permeabilidad con posibilidades altas de presencia de recurso hídrico subterráneo. Dichos materiales se encuentran en toda el área baja de la cuenca. No obstante, los materiales consolidados y los no consolidados con conductividades hidráulicas bajas también son abundantes y están localizados en las partes altas y laderas bajas de la cuenca. En la cuenca del Oriental el manto acuífero se encuentra a una profundidad de menos de un metro bajo la superficie, en las porciones más bajas.

Las aguas subterráneas de la cuenca tienen un tiempo de residencia largo lo cual ha dado como resultado una amplia disolución de las rocas por el agua subterránea. Por ejemplo, la disolución de las calizas, ha originado que se encuentren altas concentraciones de calcio en el agua subterránea de esta área.

Se destaca la presencia de varios géiseres en Los Humeros, al norte de la cuenca, los cuales han sido aprovechados por la Comisión Federal de Electricidad para el establecimiento de una planta geotérmica generadora de energía eléctrica (Alcocer et al; 2005).

2.38. REGIÓN DE ZACAPOAXTLA-TEZIUTLAN PUEBLA

Se encuentra en las siguientes coordenadas geográficas 19°43'19°58' de latitud norte; los meridianos 97°31'97°39' de longitud oeste; tiene una altitud entre 900 y 2800 m. Colinda al norte con los municipios de Xochiapulco, Xochitlán de Vicente Suárez, Nauzontla, Cuetzalan del Progreso y Tlatlauquitepec; al este con el municipio de Tlatlauquitepec; al sur con los municipios de Tlatlauquitepec, Zaragoza y Zautla; al oeste con los municipios de Zautla y Xochiapulco.

Es parte de la Sierra Madre Oriental y el Eje Neovolcánico y lagos y volcanes del Anáhuac; hay presencia de sierra baja, lomerío de aluvión antiguo con llanuras; sierra alta escarpada y vaso lacustre salino.

La temperatura ambiente de esta región es de entre 12 – 20°C. La precipitación es de entre 700 – 2100 mm. El clima es templado húmedo con abundantes lluvias en verano.

El periodo geológico es del Jurásico-Cuaternario y en menor parte es del Cretácico-Neógeno. Las rocas principales que se encuentran son ígneas extrusivas: toba ácida, basalto-brecha y rocas sedimentarias: caliza-lutita, y limolita-arenisca. Los tipos de suelos predominantes son andosol y leptosol.

Pertenece a la zona hidrográfica de Tuxpan – Nautla, a la cuenca de río Tecolutla y subcuenca del río Apulco. Las corrientes de agua principales son perennes: Apulco, Ahuacatla, Huichautla, Hueyateno y Ochiatenco e intermitentes: Ayohualateno y Xalteno (INEGI, 2009).

2.39. REGIÓN DE MARTÍNEZ DE LA TORRE VERACRUZ

Se localiza entre los paralelos 19°58'20"17' de latitud norte; los meridianos 96°56' 97°10' de longitud oeste; altitud entre 10 y 400 m. Colinda al norte con los municipios de Papantla, Tecolutla y San Rafael; al este con los municipios de San Rafael y Misantla; al sur con los municipios de Misantla, Atzalan y Tlapacoyan; al oeste con el municipio de Tlapacoyan.

Pertenece a la llanura costera del Golfo Norte y al Eje Neovolcánico, subprovincia de llanura y lomeríos y las topoformas son de chiconquiaco, lomerío con llanuras y sierra volcánica de laderas tendidas con lomerío.

La temperatura promedio es de entre 22 – 26°C. La precipitación anual es de 1900 – 2100 mm. Tiene un clima cálido húmedo con abundantes lluvias en verano.

El periodo geológico es el Neógeno- Paleógeno y Cuaternario en menor parte. Las rocas son ígnea extrusiva: ceniza volcánica, toba ácida y basalto. Rocas sedimentarias: lutita-arenisca. El suelo dominante es el phaeozem y regosol.

Pertenece a la zona hidrológica de Tuxpan-Nautla. A la cuenca de río Nautla y subcuenca de A. Solteros, río Bobos, río Nautla y río María de la Torre. Las corrientes de agua son perennes: Blanco, El Potrero, María de la Torre, Bobos, Pedernales, Martha Ruíz, Zanjas de Arena, Solteros, El Fierro y Kilate. Intermitentes Dos Arroyos (INEGI, 2009).

2.40. REGIÓN DE POZA RICA VERACRUZ

Se localiza entre los paralelos 20°29'20"36' de latitud norte; los meridianos 97°24'97°29' de longitud oeste; su altitud es de entre 40 y 200 m. Colinda al norte con los municipios de Tlaxiahuatlán y Papantla; al este con el municipio de Papantla; al sur con los municipios de Papantla y Coatzintla; al oeste con los municipios de Coatzintla y Tlaxiahuatlán.

La provincia en la que se encuentra es la llanura costera del Golfo Norte; subprovincia de llanura y lomeríos y el sistema de topofomas es de lomerío con llanuras, Sierra baja y Valle típico.

La temperatura ambiente que predomina es de entre 22 – 24°C. La precipitación pluvial es de entre 1100 – 1300 mm y el clima de Poza Rica es cálido subhúmedo con lluvias en verano.

El periodo geológico de este lugar es del Paleógeno, Cuaternario y Neógeno. La roca predominante es sedimentaria: lutita-arenisca. Tipo de suelo: regosol y phaeozem.

La hidrografía de esta zona pertenece al sistema de Tuxpan-Nautla. A la cuenca del río Cazones y subcuenca del río San Marcos y del río Cazones. Las corrientes superficiales son perennes: río Cazones (INEGI, 2009).

2.41. REGIÓN DE PANUCO VERACRUZ

Se localiza entre los paralelos 21°41'22"29' de latitud norte; los meridianos 97°54' 98°41' de longitud oeste; altitud entre 10 y 100 m. Colinda al norte con los estados de San Luis Potosí y Tamaulipas; al este con el estado de Tamaulipas y los municipios de Pueblo Viejo, Tampico Alto, y Ozuluama de Mascareñas; al sur con los municipios de Ozuluama de Mascareñas, Tempoal, El Higo y el estado de San Luis Potosí; al oeste con los estados de San Luis Potosí y Tamaulipas. Ocupa el 4.39% de la superficie del estado de Veracruz.

La provincia en la que se encuentra, es la llanura costera del Golfo Norte, subprovincia de llanuras y lomeríos. El sistema de topofomas es de tipo llanura aluvial inundable, llanura aluvial con lomerío y lomerío típico.

La temperatura ambiente oscila entre 24 – 26°C. La precipitación anual es de entre 900 – 1100 mm. El clima predominante es cálido subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad y cálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media.

El periodo geológico es del Cuaternario, Paleógeno, Cretácico y Neógeno en menor proporción. La roca ígnea extrusiva: basalto. Sedimentaria: lutita-arenisca y arenisca-conglomerado. El tipo de suelo de la región del Panuco es en su mayoría vertisol, gleysol y phaeozem y en menor parte regosol y solonchak.

Pertenece a la región hidrográfica del Pánuco. Cuenca del río Pánuco, río Tamesí y río Moctezuma. Subcuenca del río Pánuco, río Chicayan y río Moctezuma. Las corrientes de agua perennes son Tanchicuín y Pánuco; Intermitentes: El Cantarito, Estero Paite, El Moneque, Paso del Toro y de Piedras. Los cuerpos de agua perennes son: Jopoy, La Tortuga y El Chairel e intermitente: Chila (INEGI, 2009).

2.42. REGIÓN DE COATEPEC VERACRUZ

Esta región se ubica entre los paralelos 19°21'19°32' de latitud norte; los meridianos 96°47'97°06' de longitud oeste; tiene una altitud de entre 500 y 2900 m. Colinda al norte con los municipios de Perote, Acajete, Tlalnelhuayocan, Xalapa y Emiliano Zapata; al este con los municipios de Emiliano Zapata y Jalcomulco; al sur con los municipios de Jalcomulco, Tlaltetela, Teocelo y Xico; al oeste con los municipios de Xico, Perote y Acajete. Ocupa el 0.28% de la superficie del estado.

La fisiografía de este lugar es el Eje Neovolcánico y la llanura costera del Golfo Sur, subprovincia de Chiconquiaco, lagos y volcanes del Anáhuac y llanura costera veracruzana. El sistema de topoformas está conformado por lomerío de basalto, sierra volcánica con estrato volcanes o estrato volcanes aislados y lomerío típico.

La temperatura de la zona de Coatepec es de entre 10 – 24°C. La precipitación oscila entre 1100 – 2100 mm. El clima predominante es semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano, semicálido húmedo con lluvias todo el año, templado húmedo con lluvias todo el año.

El periodo geológico es del Cuaternario, Neógeno y Cretácico. Roca ígnea extrusiva: toba básica, basalto, andesita, brecha volcánica intermedia, basalto-

toba básica y toba intermedia. Sedimentaria: arenisca-conglomerado y caliza. El suelo predominante: andosol, luvisol y en menor parte phaeozem, vertisol.

Pertenece a la región hidrográfica del Papaloapan. Cuenca del río Jamapa y subcuenca del río Decozalapa y río Idolos. Las corrientes de agua perennes: Pixquiac y La Funda; Intermitentes: Atopa, Gavilán, Paso Panal (Naranjos), Pintores, Río Sordo y Tenexapa (INEGI, 2009).

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la composición iónica de las aguas superficiales del bosque de niebla

3.2 OBJETIVO PARTICULAR

Determinar:

- ✓ Potencial de hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica (CE)
- ✓ Composición iónica de: calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+), potasio (K^+), carbonato (CO_3^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-), cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), boro (B), ortofosfato (PO_4^{3-}), nitrato (NO_3^-), silicio (SiO_2)
- ✓ Medición de los sólidos totales disueltos (STD).
- ✓ Evaluación de la presión osmótica.
- ✓ Relación de Adsorción de Sodio en sus tres conceptualizaciones.
- ✓ Salinidad efectiva y potencial
- ✓ Carbonato de Sodio Residual

4. HIPÓTESIS

Conociendo las concentraciones de los principales iones del agua, se pueden hacer clasificaciones y recomendaciones, de acuerdo a las normas de calidad de agua aceptadas en la agricultura; por lo que si sabemos la composición iónica de las aguas del bosque de niebla, se podrá conocer su clasificación y emitir las recomendaciones correspondientes.

5. MATERIALES Y MÉTODO

El muestreo de aguas requiere especial atención, para que la fracción de agua a analizar no presente cambios químicos, biológicos o contaminación antes de la llegada al laboratorio. La cantidad mínima de agua que se necesita es de 0.5 L, la cual se debe almacenar en recipientes de plástico, por su resistencia y menor reacción con los iones del agua. El recipiente y su tapón se deben enjuagar 3 veces con el agua que se va a recolectar y cerrarse herméticamente.

Los muestreos se llevaron a cabo en pozos profundos, ríos, canales, arroyos, presas, lagunas, lagos y el mar. Las muestras se etiquetaron debidamente, junto con fotografías del cuerpo de agua muestreado.

5.1. ZONA DE ESTUDIO

Los muestreos se realizaron en los estados de Tlaxcala, Puebla, Veracruz y Tamaulipas, en la revisión de literatura se encuentra más información adicional de la zona de estudio.

5.2. ANÁLISIS DE LABORATORIO

Los análisis de aguas fueron realizados en el laboratorio de ciencias ambientales del área de hidrocencias en el Colegio de Postgraduados campus Montecillo. En el (cuadro 9) aparecen las determinaciones físico-químicas aplicadas a las muestras.

Cuadro 9. Análisis físico-químicos aplicados a las aguas.

Método	Equipos y materiales	Referencia
pH → Potenciométrico	Potenciómetro marca Beckman, modelo Hoffman.	APHA, 1989. 4500-H+B.
CE → Conductimetría	Conductímetro. Marca Beckman.	APHA, 1989. 25108.
Residuo Seco Evaporado y Calcinado → Gravimetría	Capsulas de porcelana, parrilla de calentamiento marca Hot-Plate y estufa.	APHA, 1989. 2540. D.
Na ⁺ y K ⁺ → Flamometría	Flamómetro IL Autocal Flame Photometer 643	APHA, 1989. 3500-Na ⁺ y K ⁺ . D
Ca ⁺² y Mg ⁺² → Volumetría	EDTA y Eriocromo Negro T como indicador, para Ca y Mg y Murexida para Ca.	APHA, 1989 3500 Ca ²⁺ , D
CO ₃ ²⁻ → Volumetría	Ácido sulfúrico y Fenolftaleína como indicador.	APHA, 1989. 2320 B.
HCO ⁻ → Volumetría	Ácido sulfúrico y Anaranjado de Metilo como indicador.	APHA, 1989. 2320. B.
Cl ⁻ → Volumetría	Nitrato de Plata y Cromato de Potasio al 5% como indicador.	APHA, 1989. 4500-C-IB.
SO ₄ ⁻² → Turbidimetría	Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35 a 420 nm.	APHA, 1989. 4500-SO42- E
PO ₄ ⁻² → Espectrometría	Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35 a 690 nm.	Rodier (1978).
B → Espectrometría	Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35 a 690 nm, Azometina-H.	Bingham, 1978.
NO ₃ ⁻ → Espectrometría	Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer, 35 a 410 nm, Ácido salicílico.	Robarge <i>et al.</i> , 1933
Si → Espectrometría	Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35 a 650 nm.	APHA 1989, 4500 Si-E
Presión Osmótica → Osmometría	Determinada mediante cálculo de acuerdo con fórmulas.	Wescor, 1985.

5.3. COMPROBACIÓN DE LOS DATOS

5.3.1. Balance Anión – Cation

Las aguas son eléctricamente neutrales, por lo que la suma de cationes debe ser igual a la suma de aniones, con un margen de error del cuatro por ciento. Para obtener el margen de error se sigue la siguiente formula:

$$\text{margen de error} = 100 \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}}$$

Cuadro 10. Criterios de aceptación para el balance de aniones y cationes.

Suma de aniones (meq L ⁻¹)	Porcentaje de diferencia ±
0.0 – 3.0	0.2
3.0 – 10.0	2.0
10.0 - 800	5.0

5.3.2. Sólidos Totales Disueltos = sólidos disueltos totales calculados

La concentración de sólidos totales disueltos medidos debe de ser mayor al calculado, porque una contribución significativa (materia orgánica disuelta) no puede ser incluida en el cálculo (Greenberg, 1992).

Si el valor de la relación STD medidos / STD calculados no se encuentra dentro de los siguientes valores, entonces se debe realizar nuevamente.

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

5.3.3. Conductividad eléctrica medida = conductividad eléctrica calculada

Las mediciones de la conductividad eléctrica de las soluciones, y el rango de variación de la conductividad eléctrica medida y calculada en mS cm⁻¹, debe estar entre los siguientes valores.

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

5.3.4. Conductividad eléctrica medida y la suma de iones

La CE y la suma de iones (CE/100), de los valores de la conductividad eléctrica expresada en $\mu\text{S cm}^{-1}$. Para diferentes tipos de salinidad el valor se encuentra entre los siguientes rangos:

$$(100) (\sum \text{aniones o cationes, meq L}^{-1}) = (0.9 - 1.1) \text{ CE}$$

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

Si los valores de la conductividad eléctrica están entre 0.1 y 5.0 dS m^{-1} , la CE, expresada en dS m^{-1} a 25 °C, multiplicada por 640 es aproximada a la concentración de iones en mg L^{-1} (Pizarro, 1985).

5.3.5. Total de solidos disueltos medidos y calculados a un rango de conductividad eléctrica

Si la conductividad de los (STD) es menor de 0.55, la suma menor de iones no es fiable y si el rango es superior a 0.7 tampoco es fiable, por lo que se debe analizar otra vez la muestra.

$$(\text{STD calculados}) \text{ y } (\text{STD medidos}) \rightarrow \text{Rango de CE} = 0.55 - 0.7$$

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ÁREAS DE MUESTREO

En el (cuadro 11) se presenta la localización geográfica de los puntos de muestreo de agua superficial del bosque de niebla de las siguientes regiones: El Oriental, Puebla; Zacapoaxtla-Teziutlan, Puebla, y Coatepec-Huatusco, Veracruz. El muestreo continúa en zonas donde el agua del bosque de niebla tiene flujo a las regiones bajas de Martínez de la Torre-Tlapacoyan, Veracruz; Poza Rica-Cazones, Veracruz y Pánuco, Veracruz.

En la segunda parte del muestreo (cuadro 12) se analiza las aguas con conductividades eléctricas elevadas como el maar Tecuitlapa que tiene $6000 \mu\text{S cm}^{-1}$ y la playa Miramar $56000 \mu\text{S cm}^{-1}$, este recorrido corresponde a las regiones de: El Oriental, Puebla; Poza Rica-Tuxpan, Veracruz y Ciudad Madero- Tampico, Tamaulipas.

Los lagos cráter o maars se originaron debido a explosiones volcánicas que ocasionaron fallas y rupturas en los espesores saturados de alumbraamientos de aguas subterráneas. Los lagos cráter de la cuenca Oriental son: Alchichica, la Preciosa, Quechulac, Aljojuca, Tecuitlapa y Atexcac. Las aguas de los lagos cráter de Alchichica, Atexcac y Tecuitlapa son salinas (Can, 2011; Arredondo et al., 1983; Gasca, 1982).

Las elevaciones terrestres donde están los sitios de muestreo son desde 2901 m en la geotérmica los Humero, Puebla y el punto de muestreo más bajo 0 m en la playa Miramar, Tamaulipas. En la Cuenca Oriental destacan dos, de los estratovolcanes más altos del país, el Pico de Orizaba o Citlaltépetl con altitud de 5610 m y la Malinche con altitud de 4461 m. Las temperaturas medidas de la zona de ciudad Madero-Tampico son de 30°C . Mientras que las temperaturas medidas en la región de la Ex Hacienda de Chautla en San Salvador El Verde, Puebla son de 15°C .

El muestreo se realizó en el mes de abril del 2015, iniciando en el bordo uno de la laguna de Tlalpan en el estado de Tlaxcala y finalizando en el río Dos Puentes en Huatusco Veracruz, el recorrido tuvo una duración de 10 días.

Cuadro 11. Localización geográfica de los puntos de muestreo de las aguas del bosque de niebla de Veracruz, Puebla y Tlaxcala.

Muestra	Lugar	Coordenadas geográficas	Elev. (m)	T (°C)
1	Geotérmica Los Humeros, Puebla	19°39'00.21' N, 97°26'26.80' O	2901	28.0
2	Presa Nanacamilpa, Tlaxcala	19°27'59.51' N, 98°33'45.72' O	2802	19.5
3	Santiago Tlalpan bordo I, Tlaxcala	19°28'30.40' N, 98°18'41.50' O	2653	18.0
4	Laguna de Santiago Tlalpan, Tlaxcala	19°28'40.28' N, 98°18'27.51' O	2650	20.5
5	Santiago Tlalpan bordo II, Tlaxcala	19°28'27.16' N, 98°18'45.63' O	2632	19.7
6	Pozo agrícola, Buenos Aires, Puebla	19°10'18.42' N, 97°33'31.38' O	2382	18.2
7	Maar Aljojuca, Puebla	19°05'29.76' N, 97°31'50.25' O	2378	20.9
8	Manantial Vicencio, Puebla	19°16'17.56' N, 97°42'24.72' O	2360	22.5
9	Hacienda Vicencio, Puebla	19°17'22.28' N, 97°40'47.15' O	2358	20.3
10	Nac. El Carmen, Tequexquitla, Tlaxcala	19°19'01.12' N, 97°37'57.13' O	2354	21.9
11	Nac. El Carmen II, Tequexquitla, Tlaxcala	19°18'59.74' N, 97°37'59.86' O	2354	23.3
12	Maar Quechulac, Puebla	19°22'39.40' N, 97°21'12.42' O	2348	18.6
13	Nac. San Antonio Atotonilco, Tlaxcala	19°22'20.52' N, 98°28'02.07' O	2340	24.4
14	Maar Preciosa, Puebla	19°22'21.53' N, 97°22'56.96' O	2337	18.5
15	Cascada Atlhuetzia, Tlaxcala	19°21'53.50' N, 98°10'56.99' O	2332	19.7
16	Nac. Hacienda Chautla, Puebla	19°28'28.31' N, 98°28'28.31' O	2330	15.4
17	Nac. Hacienda Chautla II, Puebla	19°19'04.19' N, 98°28'27.02' O	2326	14.7
18	Laguna Hacienda Chautla, Puebla	19°19'04.28' N, 98°28'26.73' O	2325	22.0
19	Cascada Atlhuetzia II, Tlaxcala	19°21'53.01' N, 98°10'52.10' O	2318	17.6
20	Río Atoyac, San Lucas El Grande, Puebla	19°19'21.62' N, 98°27'39.98' O	2285	17.4
21	Río Atoyac II, San Lucas El Grande, Pue.	19°18'55.35' N, 98°27'43.08' O	2284	20.0
22	Arrollo Ayahualulco, Veracruz	19°20'58.79' N, 97°10'03.69' O	2280	14.8
23	Río Zahuapan, Tlaxcala	19°20'24.83' N, 98°11'56.04' O	2254	21.3
24	Río Pancho Poza III, Altotonga, Veracruz	19°45'23.24' N, 97°15'07.27' O	1918	22.5
25	Río Pancho Poza II, Altotonga, Veracruz	19°45'47.19' N, 97°15'08.58' O	1872	22.5
26	Río Pancho Poza, Altotonga, Veracruz	19°46'49.54' N, 97°15'01.80' O	1774	21.7
27	Río Apulco, Veracruz	19°53'41.48' N, 97°35'40.28' O	1693	17.6
28	Río Ixticpan, Teziutlan, Puebla	19°50'58.15' N, 97°20'22.63' O	1687	19.2
29	Río Atzalan, Veracruz	19°47'31.13' N, 97°14'29.74' O	1674	22.8
30	Arrollo Ixhuacan, Veracruz	19°20'30.06' N, 97°06'04.88' O	1645	18.2
31	Cascada Xalapan, Zacapoaxtla, Puebla	19°55'00.75' N, 97°36'37.70' O	1379	19.2
32	Río Dos Puentes, Huatuxco, Veracruz	19°10'39.04' N, 96°57'33.90' O	1289	19.1
33	Arrollo Teocelo, Veracruz	19°22'54.81' N, 96°59'59.06' O	1213	20.0
34	Río Mahuixtlan, Coatepec, Veracruz	19°27'46.32' N, 96°56'55.45' O	1184	21.0
35	Río Bernardo Coatepec, Veracruz	19°26'05.53' N, 96°54'42.19' O	1036	20.3
36	Río Alseseca III, Tlapacoyan, Veracruz	19°54'41.65' N, 97°13'00.22' O	663	20.0
37	Escurrimiento Atzalan, Veracruz	19°54'58.09' N, 97°12'57.88' O	630	20.0
38	Cascada Tomata, Tlapacoyan, Veracruz	19°55'27.87' N, 97°13'15.09' O	534	21.5
39	Hidroeléctrica Encanto, Tlapacoyan, Ver	19°56'08.43' N, 97°12'40.53' O	462	23.5
40	Río Pescados, Jalcomulco, Veracruz	19°19'49.42' N, 96°45'47.17' O	344	23.5
41	Río Alseseca II, Tlapacoyan, Veracruz	19°58'40.55' N, 97°10'35.24' O	293	23.5

...Cuadro 11

Muestra	Lugar	Coordenadas geográficas	Elev. (m)	T (°C)
42	Río Alseseca, Tlapacoyan, Veracruz	19°58'40.79"N, 97°10'36.23"O	286	23.8
43	Río Mezonate, Ayotoxco, Puebla	20°06'47.03"N, 97°25'44.57"O	187	28.0
44	Río Gachupinate, Ayotoxco, Puebla	20°07'38.68"N, 97°23'59.50"O	182	28.0
45	Río Apulco II, Ayotoxco, Puebla	20°07'29.59"N, 97°27'38.59"O	118	26.5
46	Cascada Xoyoquila, Tenampulco, Pue	20°12'37.60"N, 97°23'50.88"O	107	26.8
47	Río Cedro Viejo, Tenampulco, Puebla	20°12'03.30"N, 97°24'09.12"O	103	25.5
48	Río Bobos, Matínez de la Torre, Ver	20°02'54.24"N, 97°05'08.06"O	85	26.0
49	Río Cazonés II, Poza Rica, Veracruz	20°32'11.09"N, 97°28'16.82"O	52	29.0
50	Río Chichicazautla, M. de la Torre, Ver	20°06'12.00"N, 97°00'49.09"O	51	28.6
51	Arrollo Totolapa, Poza Rica, Veracruz	20°33'34.66"N, 97°28'34.30"O	48	28.0
52	Río Cazonés III, Poza Rica, Veracruz	20°32'35.69"N, 97°28'32.38"O	46	29.5
53	Río Tecolutla, Espinal, Veracruz	20°14'32.87"N, 97°23'44.36"O	44	29.0
54	Río Tempoal, Veracruz	21°31'15.35"N, 98°23'55.44"O	29	28.9
55	Río Cazonés, Veracruz	20°38'07.17"N, 97°23'54.26"O	26	30.0
56	Río Pantepec, Alamo, Veracruz	20°55'41.64"N, 97°40'50.62"O	19	31.8
57	Río Tecolutla II, Papantla, Veracruz	20°23'52.64"N, 97°14'20.25"O	16	28.7
58	Río Pánuco, Veracruz	22°03'35.67"N, 98°10'36.88"O	9	29.0
59	Río La Cortadora, Panuco, Veracruz	22°10'57.92"N, 98°01'08.38"O	3	29.3

Cuadro 12. Localización geográfica de los puntos de muestreo de las aguas con alta conductividad eléctrica de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

Muestra	Lugar	Coordenadas geográficas	Elevación (m)	T (°C)
1	Maar Tecuitlapa, Puebla	19°07'29.29"N, 97°32'41.97"O	2385	25.6
2	Maar Atexcac, Puebla	19°20'12.85"N, 97°26'57.29"O	2382	19.5
3	Laguna Totolcingo, Puebla	19°18'30.56"N, 97°36'58.15"O	2346	23.0
4	Maar Alchichica, Puebla	19°25'04.59"N, 97°24'41.82"O	2331	18.5
5	Río Tuxpan, Veracruz	20°56'55.64"N, 97°25'05.46"O	9	30.6
6	Río Pánuco II, Tampico, Tamaulipas	22°13'36.75"N, 97°50'10.01"O	2	30.0
7	Playa Miramar, Cd Madero, Tams	22°16'51.89"N, 97°47'43.89"O	0	30.0

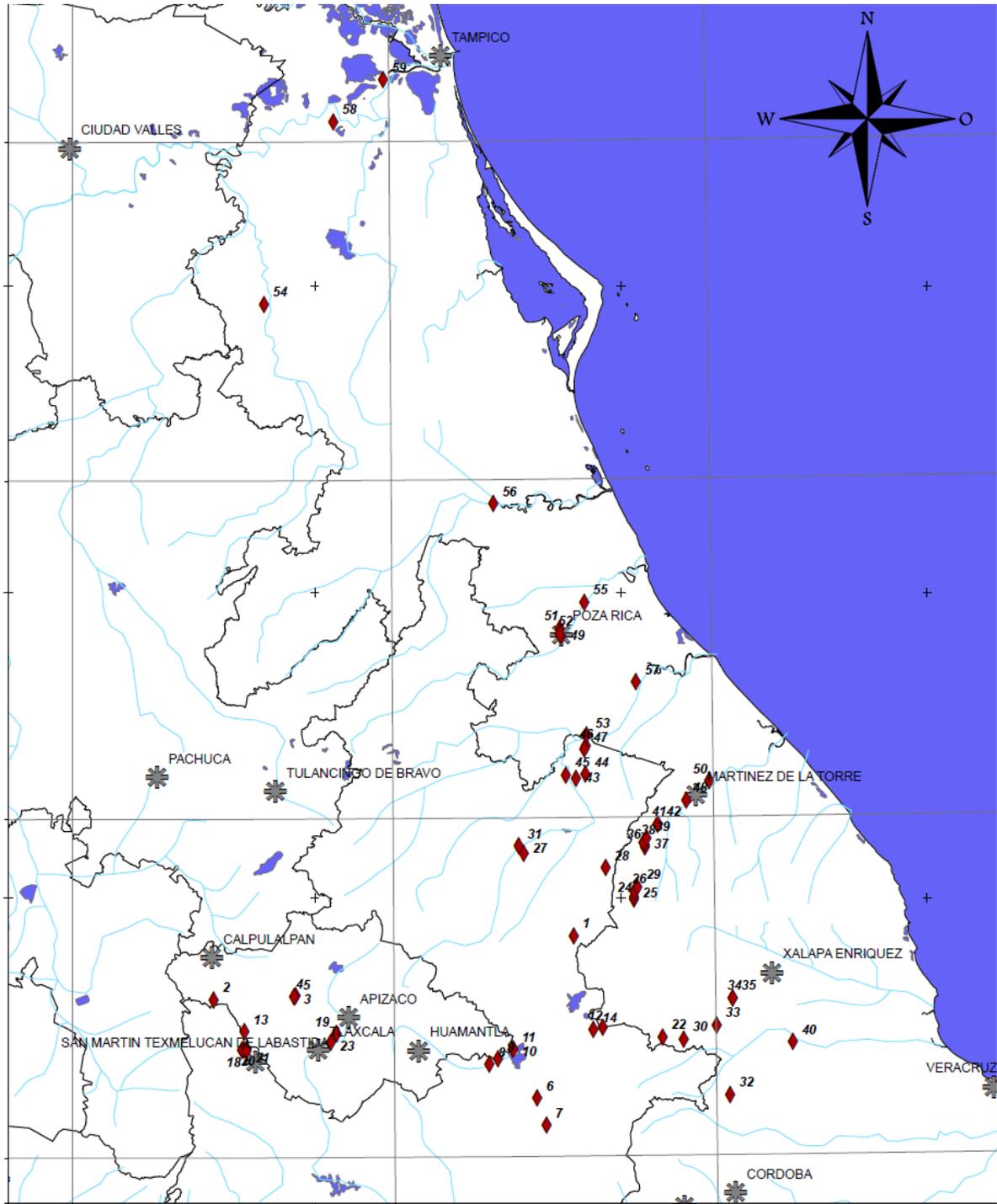


Figura 3. Mapa de las estaciones de muestreo de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

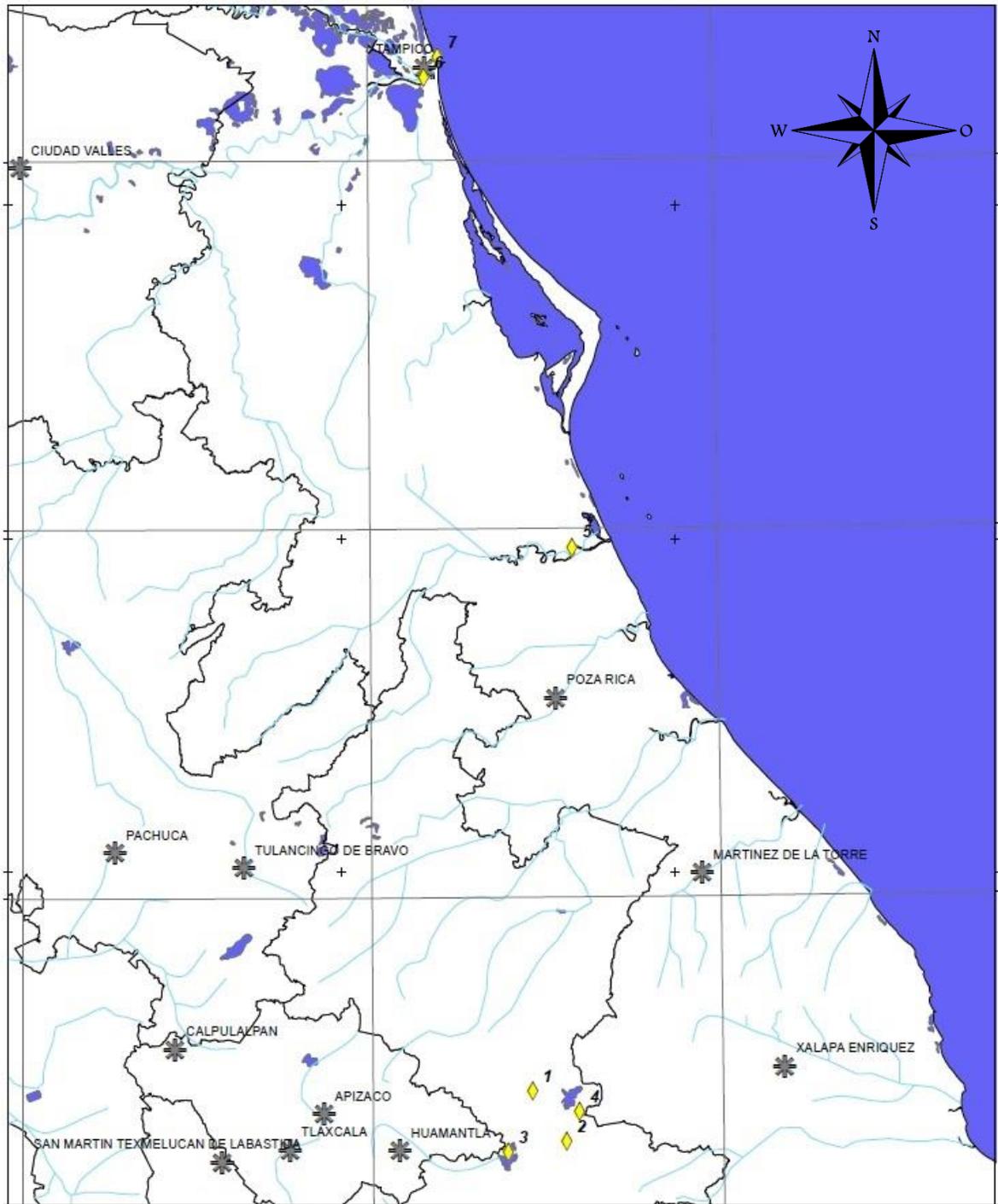


Figura 4. Mapa de las estaciones de muestreo de las aguas con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

6.2. COMPOSICIÓN IÓNICA DE LAS AGUAS

Conocer la composición de las aguas de irrigación es importante porque el exceso de sodio, carbonatos, bicarbonatos y cloruros, aumentarán el pH, la conductividad eléctrica y el porcentaje de sodio intercambiable del suelo en donde se apliquen (Choudhary et al., 2006).

La concentración de los cationes, en los maars, sigue el orden de: $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ y con respecto a los aniones, para los lagos cráter de Alchichica, Atexcac y la Preciosa, por lo general siguen el orden de: $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-}$ y para los lagos Quechulac, Aljojuca Tecuitlapa el orden es: $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-}$. Los iones más abundantes de los lagos cráter son Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- y HCO_3^- , esta composición química se asemeja a la del agua de mar, donde los iones más abundantes son Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- y SO_4^{2-} (Millero, 1975).

En la composición iónica de las aguas muestreadas en Tlaxcala, Puebla y Veracruz predominaron los iones bicarbonato y el calcio principalmente. Con base en que las rocas volcánicas están constituidas principalmente por minerales silicatados, los cuales en la mayoría de los casos son insolubles; se puede decir que las aguas que recorren y se almacenan en esta zona de estudio, son de concentraciones iónicas bajas (Mancilla, 2012).

En las regiones volcánicas, como lo es gran parte del estado de Puebla, Tlaxcala y parte importante de Veracruz, el bióxido de carbono se mezcla con el agua y forma aguas ricas en iones bicarbonato, sin embargo en el estado de Veracruz, la característica principal es la presencia de escurrimientos que fluyen a través de los carsos. Una gran cantidad de anhídrido carbónico es arrojado a la atmosfera por la actividad volcánica, éste destruye las rocas eruptivas, extrayendo los metales. Al combinarse con el calcio y el magnesio se acumula como caliza y dolomita.

El CO_3^{2-} es proveniente del lavado de rocas calizas, parte del CO_3^{2-} pasa al agua generando condiciones de alcalinidad, (Richard et al, 1982) indicaron que cuando el pH sea menor de 8.2 no habrá presencia de CO_3^{2-} .

Custodio y Llamas (1996), Cerón *et al.* (2000) y (Poulsen *et al.*, 2006), indican que las aguas en contacto con rocas evaporíticas contienen concentraciones elevadas de sodio y potasio solo si estos elementos están presentes fundamentalmente

como cloruro de sodio, silvina (KCl) o carnalita (KCl MgCl₂). Debido a que estas sales no se encuentran en el área de estudio, su concentración en las aguas es poca. Además, el potasio tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y de adsorción en la superficie de minerales arcillosos con alta capacidad de intercambio iónico. Altas concentraciones de estos iones pueden ser indicio de contaminación por aguas residuales y agrícolas. En el (cuadro 13 y 14) aparecen las composiciones iónicas de las aguas.

Cuadro 13. Composición iónica de las aguas del boque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Muestra	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SUMA	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SUMA	Σ Iones	RSE	Error													
																μS cm ⁻¹	meq L ⁻¹					mg L ⁻¹					mg L ⁻¹	%
																	mmol L ⁻¹											
1	7.5	926	3.79	3	1.02	1.25	9.06	0	2.1	2	4.71	8.81		3010	1.4													
			75.95	36.45	27.6	48.9		0	128.1	70.9	226		614.1															
			1.9	1.5	1.02	1.25		0	2.1	2	2.36		12.13															
2	7.3	301	1.12	1.2	0.46	0.16	2.94	0	1.73	0.96	0.16	2.85		164	1.55													
			22.44	14.58	10.58	6.26		0	105.5	34	7.68		201.1															
			0.56	0.6	0.46	0.16		0	1.73	0.96	0.08		4.55															
3	7.1	304	1.21	1.08	0.52	0.16	2.97	0	1.73	0.97	0.18	2.88		234	1.54													
			24.25	13.12	11.96	6.26		0	105.5	34.4	8.65		204.16															
			0.61	0.54	0.52	0.16		0	1.73	0.97	0.09		4.62															
4	7.6	393	1.42	1.57	0.6	0.22	3.81	0	2.23	1.26	0.21	3.7		212	1.46													
			28.46	19.08	13.8	8.6		0	136	44.7	10.1		260.73															
			0.71	0.79	0.6	0.22		0	2.23	1.26	0.11		5.92															
5	7	230	0.85	0.92	0.36	0.12	2.25	0	1.32	0.74	0.12	2.18		102	1.58													
			17.03	18.42	8.28	4.69		0	80.52	26.2	5.76		160.93															
			0.43	0.46	0.36	0.12		0	1.32	0.74	0.06		3.49															
6	8	672	1.98	2.38	1.83	0.38	6.57	0	3.56	2.3	0.54	6.4		408	1.31													
			39.68	28.92	42.09	14.9		0	217.2	81.5	25.9		450.19															
			0.99	1.19	1.83	0.38		0	3.56	2.3	0.27		10.52															
7	9.1	1424	0.04	0.18	13.05	0.52	13.79	1.62	5.98	4.96	0.79	13.41		800	1.4													
			0.8	2.19	300.2	20.3		50.4	364.8	176	37.9		952.42															
			0.02	0.09	13.05	0.52		0.84	5.98	4.96	0.4		25.86															
8	7.6	351	1.13	1.12	1.02	0.16	3.43	0	2.09	1.12	0.13	3.34		240	1.33													
			22.65	13.61	23.46	6.26		0	127.5	39.7	6.24		233.17															
			0.57	0.56	1.02	0.16		0	2.09	1.12	0.07		5.59															
9	7.6	447	1.48	1.11	1.52	0.22	4.33	0	2.45	1.52	0.22	4.19		262	1.64													
			29.65	13.49	34.96	8.6		0	149.5	53.9	10.6		300.6															
			0.74	0.56	1.52	0.22		0	2.45	1.52	0.22		7.23															
10	7.9	682	1.8	1.86	2.63	0.38	6.67	0	3.74	2.38	0.36	6.48		414	1.44													
			36.07	22.6	60.49	14.9		0	228.1	84.4	17.3		463.82															
			0.9	0.93	2.63	0.38		0	3.74	2.38	0.18		11.14															
11	7.6	1241	2.24	2.16	7.28	0.46	12.14	0	6.81	4.5	0.52	11.83		708	1.29													
			44.89	26.24	167.4	18		0	415.4	160	25		856.48															
			1.19	1.08	7.28	0.46		0	6.81	4.5	0.26		21.51															
12	8.7	961	0.87	0.96	7.13	0.36	9.31	1.86	3.06	3.47	0.62	9.01		522	1.64													
			17.47	11.66	164	14.1		55.8	186.7	123	29.8		602.41															
			0.44	0.48	7.13	0.36		0.98	3.06	3.47	0.31		16.23															
13	6.8	1186	3.14	2.03	5.98	0.34	11.49	0	6.3	4.32	0.48	11.1		690	1.73													
			62.93	24.66	137.5	13.3		0	384.3	153	23.2		799.04															

Cuadro 13...

Muestra	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SUMA	meq L ⁻¹				SUMA	Σ Iones	RSE	Error	
								mg L ⁻¹								
								mmol L ⁻¹								
								μS cm ⁻¹								
													mg L ⁻¹	%		
14	8.7	2472	0.32	0.48	22.45	0.69	23.94	2.24	11.02	8.58	1.46	23.3		1586	1.35	
			6.41	5.83	516.4	27		66	672.2	304	70.1		1668.07			
			0.16	0.24	22.45	0.35		1.12	11.02	8.58	0.73		44.65			
15	7.2	634	1.26	1.73	2.85	0.35	6.19	0	3.44	2.23	0.33	6		334	1.56	
			25.25	21.02	65.55	13.7		0	209.8	79.1	15.9		430.25			
			0.63	0.87	2.85	0.35		0	3.44	2.33	0.17		10.64			
16	7.2	205	0.74	0.78	0.35	0.11	1.98	0	1.13	0.68	0.12	193		136	1.28	
			14.83	9.48	8.05	4.3		0	68.96	24.1	5.76		135.46			
			0.37	0.39	0.35	0.11		0	1.13	0.68	0.06		3.09			
17	7	242	0.93	0.9	0.41	0.13	2.37	0	1.35	0.8	0.14	2.29		166	1.72	
			18.64	10.94	9.43	5.08		0	82.35	28.4	6.72		161.52			
			0.47	0.45	0.41	0.13		0	1.35	0.8	0.07		3.68			
18	7.8	212	0.85	0.77	0.34	0.11	2.07	0	1.19	0.69	0.12	2		124	1.72	
			17.03	9.36	7.82	4.3		0	72.58	24.5	5.76		141.32			
			0.43	0.39	0.34	0.11		0	1.19	0.69	0.06		3.21			
19	7.2	627	1.49	1.76	2.64	0.18	6.07	0	3.24	2.26	0.36	5.86		314	1.76	
			29.86	21.38	60.72	8.65		0	197.6	80.1	17.3		415.66			
			0.75	0.88	2.64	0.18		0	3.24	2.26	0.18		10.13			
20	7	303	0.61	0.86	1.39	0.1	2.96	0	1.62	1.12	0.12	2.86		194	1.72	
			12.22	10.45	31.97	3.91		0	98.82	39.7	5.76		202.83			
			0.31	0.43	1.39	0.1		0	1.62	1.12	0.01		5.03			
21	6.9	535	1.42	1.11	2.46	0.19	5.18	0	2.66	2.08	0.24	4.92		376	1.97	
			28.46	13.49	56.58	7.43		0	162.3	73.7	11.5		353.49			
			0.71	0.56	2.46	0.19		0	2.66	2.08	0.12		8.78			
22	8	98	0.23	0.22	0.48	0.03	0.96	0	0.54	0.32	0.08	0.94		88	1.05	
			4.61	2.67	11.04	1.17		0	32.94	11.3	3.84		67.61			
			0.12	0.11	0.48	0.03		0	0.54	0.32	0.04		1.64			
23	7.3	960	1.52	1.78	4.62	0.24	9.39	0	4.97	3.92	0.26	9.15		526	1.29	
			30.46	21.63	106.3	9.38		0	303.2	139	12.5		618.35			
			0.86	0.89	4.62	0.24		0	4.97	3.92	0.13		15.63			
24	6.8	867	2.15	1.92	4.22	0.19	8.48	0	4.4	3.53	0.24	8.17		462	1.86	
			43.09	23.33	97.06	7.43		0	268.4	125	11.5		575.98			
			1.08	0.96	4.22	0.19		0	4.4	3.53	0.12		14.5			
25	7.9	860	1.99	1.96	4.24	0.22	8.41	0	4.34	3.57	0.22	8.13		524	1.69	
			39.88	23.81	97.52	8.6		0	264.7	127	10.6		571.68			
			1	0.98	4.24	0.22		0	4.34	3.57	0.11		14.46			
26	8	823	1.92	1.86	4.06	0.21	8.05	0	4.09	3.48	0.2	7.77		500	1.77	
			38.48	22.6	93.38	8.21		0	249.5	123	9.61		545.14			
			0.96	0.93	4.06	0.21		0	4.09	3.48	0.1		13.83			

Cuadro 13...

Muestra	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SUMA	meq L ⁻¹				SUMA	Σ Iones	RSE	Error
								CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻				
			μS cm ⁻¹					mg L ⁻¹				mg L ⁻¹	%		
								mmol L ⁻¹							
27	7.3	2485	2.93	3.62	16.9	0.62	24.07	0	13.45	9.16	0.68	23.29	186	1.65	
			58.72	43.98	388.7	24.2	0	820.5	325	32.7	1693.47				
			1.47	1.81	16.9	0.62	0	13.45	9.16	0.34	43.75				
28	7.1	468	1.69	1.87	0.75	0.26	4.57	0	2.67	1.52	0.25	4.44	250	1.44	
			33.87	22.72	17.25	10.2	0	162.9	53.9	12	312.77				
			0.85	0.94	0.75	0.26	0	2.67	1.52	0.13	8.33				
29	8.3	842	1.73	1.88	4.2	0.42	8.23	0.62	4.47	3.32	0.22	8.01	518	1.35	
			34.67	22.84	96.6	16.4	18.6	272.7	118	10.6	590.06				
			0.87	0.94	4.2	0.42	0.31	4.47	3.32	0.11	14.64				
30	7.4	145	0.34	0.46	0.55	0.07	1.42	0	0.82	0.48	0.08	1.38	104	1.43	
			6.81	5.59	12.65	2.74	0	50.02	17	3.84	98.67				
			0.17	0.23	0.55	0.07	0	0.82	0.48	0.04	2.36				
31	7.8	247	0.75	0.78	0.72	0.14	2.39	0	1.35	0.84	0.14	2.33	158	1.27	
			15.03	9.48	16.56	6.72	0	82.35	29.8	6.72	166.64				
			0.38	0.39	0.72	0.14	0	1.35	0.84	0.07	3.89				
32	7.6	70	0.18	0.26	0.2	0.04	0.68	0	0.36	0.26	0.04	0.66	46	1.49	
			3.61	3.16	4.6	1.56	0	21.96	9.22	1.92	46.03				
			0.09	0.13	0.2	0.04	0	0.36	0.26	0.02	1.1				
33	7	129	0.36	0.46	0.37	0.07	1.26	0	0.69	0.46	0.08	1.23	86	1.2	
			7.21	5.59	8.51	2.74	0	42.09	16.3	3.84	86.29				
			0.18	0.23	0.37	0.07	0	0.69	0.46	0.04	2.04				
34	7	170	0.53	0.5	0.53	0.09	1.65	0	0.96	0.54	0.1	1.6	126	1.54	
			10.62	60.08	12.19	3.52	0	58.56	19.1	4.8	114.91				
			0.27	0.25	0.53	0.09	0	0.96	0.54	0.05	2.69				
35	7.6	89	0.25	0.3	0.25	0.06	0.86	0	0.47	0.33	0.04	0.84	70	1.18	
			5.01	3.65	5.75	2.35	0	28.67	11.7	1.92	59.05				
			0.13	0.15	0.25	0.06	0	0.47	0.33	0.02	1.41				
36	8	504	1.44	1.38	1.78	0.28	4.88	0	2.67	1.78	0.29	4.74	412	1.46	
			28.86	16.77	40.94	11	0	162.9	63.1	11.3	334.83				
			0.72	0.69	1.78	0.28	0	2.67	1.78	0.29	8.21				
37	7.9	40	0.14	0.1	0.13	0.02	0.39	0	0.22	0.14	0.02	0.38	162	1.3	
			2.81	1.22	2.99	0.78	0	13.42	4.96	0.96	27.14				
			0.07	0.05	0.13	0.02	0	0.22	0.14	0.01	0.64				
38	7.9	281	0.76	0.92	0.87	0.17	2.72	0	1.52	0.96	0.15	2.63	194	1.68	
			15.23	11.18	20.01	6.65	0	92.72	34	7.2	187.02				
			0.38	0.46	0.87	0.17	0	1.52	0.96	0.08	4.44				
39	7.3	287	0.95	0.85	0.82	0.16	2.78	0	1.52	1.01	0.16	2.69	178	1.65	
			19.04	10.33	18.86	6.26	0	92.72	35.8	7.68	190.69				
			0.48	0.43	0.89	0.16	0	1.52	1.01	0.08	4.5				

Cuadro 13...

Muestra	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SUMA	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SUMA	Σ Iones	RSE	Error
			meq L ⁻¹										mg L ⁻¹	%	
			mg L ⁻¹												
			mmol L ⁻¹												
40	7	204	0.6	0.62	0.64	0.12	1.98	0	1.07	0.72	0.12	1.91		134	1.8
			12.04	7.53	14.72	4.69		0	65.27	25.5	5.76		135.53		
			0.3	0.31	0.64	0.12		0	1.07	0.72	0.06		3.22		
41	6.7	163	0.49	0.52	0.48	0.09	1.58	0	0.93	0.52	0.09	1.54		160	1.28
			9.82	6.32	11.04	3.52		0	56.73	18.4	4.32		110.18		
			0.25	0.26	0.48	0.09		0	0.93	0.52	0.05		2.58		
42	6.8	197	0.47	0.48	0.9	0.08	1.93	0	1.04	0.72	0.11	1.87		174	1.58
			9.42	5.83	20.7	3.13		0	63.44	25.5	5.28		133.32		
			0.24	0.24	0.9	0.08		0	1.04	0.72	0.06		3.28		
43	7.6	139	0.34	0.42	0.51	0.08	1.35	0	0.72	0.52	0.08	1.32		82	1.12
			6.81	5.1	11.73	3.13		0	43.92	18.4	3.84		92.96		
			0.17	0.21	0.51	0.08		0	0.72	0.52	0.04		2.25		
44	7.7	325	0.72	1.04	1.21	0.21	3.18	0	1.66	1.23	0.2	3.09		168	1.44
			14.43	12.64	27.83	8.21		0	101.3	43.6	9.61		217.52		
			0.36	0.52	1.21	0.21		0	1.66	1.23	0.1		5.29		
45	7.4	244	0.53	0.6	1.16	0.1	2.39	0	1.23	0.92	0.16	2.31		204	1.7
			10.62	7.2	26.68	3.91		0	75.03	32.6	7.68		163.73		
			0.27	0.3	1.16	0.1		0	1.23	0.92	0.08		4.06		
46	7.8	66	0.15	0.16	0.31	0.03	0.65	0	0.35	0.24	0.04	0.63		34	1.56
			3.01	1.94	7.13	1.17		0	21.35	8.51	1.92		45.03		
			0.08	0.08	0.31	0.03		0	0.35	0.24	0.02		1.11		
47	8.1	105	0.26	0.28	0.42	0.6	1.02	0	0.54	0.39	0.06	0.99		64	1.5
			5.21	3.4	9.66	2.35		0	32.94	13.8	2.88		70.27		
			0.13	0.14	0.42	0.06		0	0.54	0.39	0.03		1.71		
48	7.6	275	0.8	0.77	0.96	0.15	2.68	0	1.5	0.9	0.15	2.59		200	1.71
			16.32	9.36	22.08	5.87		0	91.5	33.3	7.2		185.65		
			0.4	0.39	0.96	0.15		0	1.5	0.94	0.08		4.42		
49	7.5	699	1.14	1.02	4.32	0.29	6.77	0	3.42	2.69	0.42	6.53		356	1.8
			22.85	12.39	99.36	11.3		0	208.6	95.4	20.2		468.09		
			0.57	0.51	4.32	0.29		0	3.42	2.69	0.21		12.01		
50	7.5	477	0.77	0.68	2.97	0.2	4.62	0	2.38	1.84	0.28	4.5		290	1.32
			15.43	8.26	68.31	7.82		0	145.2	65.2	13.5		323.68		
			0.39	0.34	2.97	0.2		0	2.38	1.84	0.14		8.26		
51	7.6	559	0.92	0.78	3.48	0.23	5.41	0	2.79	2.15	0.33	5.27		332	1.31
			18.44	9.48	80.04	8.99		0	170.2	76.2	15.9		379.21		
			0.46	0.39	3.48	0.23		0	2.79	2.15	0.17		9.67		
52	7.3	317	0.54	0.42	1.98	0.13	3.07	0	1.57	1.26	0.16	2.99		208	1.32
			10.82	5.1	45.54	5.08		0	95.77	44.7	7.68		214.66		
			0.27	0.21	1.98	0.13		0	1.57	1.26	0.08		5.5		

Cuadro 13...

Muestra	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SUMA	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SUMA	Σ Iones	RSE	Error
														mg L ⁻¹	%
														μS cm ⁻¹	meq L ⁻¹
														mmol L ⁻¹	mg L ⁻¹
53	7.5	281	0.44	0.38	1.78	0.12	2.72	0	1.4	1.08	0.17	2.65		142	1.3
			8.82	4.62	40.94	4.69		0	85.4	38.3	8.17	190.93			
			0.22	0.19	1.78	0.12		0	1.4	1.08	0.09	4.88			
54	7.5	416	0.54	0.63	2.68	0.18	4.03	0	2.06	1.6	0.25	3.91		214	1.51
			10.82	7.65	64.64	7.04		0	125.7	56.7	12	281.53			
			0.27	0.32	2.68	0.18		0	2.06	1.6	0.13	7.24			
55	7.4	347	0.51	0.56	2.18	0.14	3.39	0	1.81	1.28	0.18	3.27		236	1.8
			10.22	6.8	50.14	5.47		0	110.4	45.4	8.65	237.07			
			0.26	0.28	2.18	0.14		0	1.81	1.28	0.09	6.04			
56	7.1	288	0.48	0.38	1.83	0.13	2.82	0	1.52	1.07	0.16	2.75		176	1.26
			9.62	4.62	42.09	5.08		0	92.72	37.9	7.68	199.74			
			0.24	0.19	1.83	0.13		0	1.52	1.07	0.08	5.06			
57	7.5	299	0.47	0.52	1.8	0.13	2.92	0	1.49	1.14	0.18	2.81		168	1.92
			9.42	6.32	41.4	5.08		0	90.89	40.4	8.65	202.17			
			0.24	0.26	1.8	0.13		0	1.49	1.14	0.09	5.15			
58	7.6	900	1.46	1.56	5.42	0.36	8.8	0	4.54	3.43	0.54	8.51		542	1.68
			29.26	18.95	124.7	14.1		0	276.9	122	25.9	611.42			
			0.73	0.78	5.42	0.36		0	4.54	3.43	0.27	15.53			
59	7.7	895	1.02	1.42	5.87	0.36	8.67	0	4.4	4.49	0.5	8.39		538	1.64
			20.44	17.25	135	14.1		0	268.4	124	24	602.92			
			0.51	0.71	5.87	0.36		0	4.4	3.49	0.25	15.59			

Cuadro 14. Composición iónica de las aguas muestreadas con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Tlaxcala y Tamaulipas.

Muestra	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SUMA	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SUMA	Σ Iones	RSE	Error											
																meq L ⁻¹										
																mg L ⁻¹										
																mmol L ⁻¹										
μS cm ⁻¹											mg L ⁻¹	%														
1	9.7	6000	0.02	0.68	54.75	3.22	58.67	6.98	21.18	24.1	4.84	57.12		4272	1.34											
			0.4	8.26	1259	126		209.4	1322	855	232		4013.21													
			0.01	0.34	54.75	3.22		3.49	21.18	24.1	2.42		109.53													
2	8.6	13000	0.86	32.96	84.31	7.76	125.89	16.26	26.84	67	12.5	122.64		9152	1.31											
			17.23	400.5	1939	303		487.8	1637	2375	601		7762.48													
			0.43	16.48	84.31	7.76		8.13	26.84	67	6.26		217.23													
3	9.6	24000	0.08	1.2	211.6	19.5	232.43	28.62	51.51	108	38.1	226.37		16984	1.32											
			1.6	14.58	4867	764		858.6	3142	3833	1831		15311.7													
			0.04	0.6	211.6	19.5		14.31	51.54	108	19.1		424.79													
4	8.9	14000	1.1	36.5	90.99	8.32	136.91	18.14	25.96	71	18.2	133.27		8898	1.35											
			22.04	443.5	2093	325		544.2	1584	2516	874		7527.25													
			0.55	18.25	90.9	8.32		9.07	25.96	71	9.1		233.12													
5	7.6	11500	8.7	28.86	69.21	4.6	113.37	0	57.04	43.8	6.9	107.74		27432	1.66											
			174.3	350.6	1592	180		0	3479	1553	331		7660.53													
			4.35	14.43	69.21	4.6		0	57.04	43.8	3.45		196.88													
6	7.7	5000	6.12	8.26	30.14	3.9	48.42	0	23.78	19.07	3.9	46.75		3482	1.75											
			122.6	100.3	693.2	152		0	1450	676	187.3		3382.6													
			3.06	4.13	30.14	3.9		0	23.78	19.07	1.95		86.03													
7	7.8	56000	10.6	150.4	379.3	7.29	547.63	0	30.8	436.8	65.77	533.4		39888	1.31											
			236.7	1864	8952	262		0	1700	15831	3438		32282													
			5.76	78.4	389.7	6.9		0	27.8	451.6	33.3		993.51													

6.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Cuadro 15. Análisis estadístico de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

	pH	CE μS cm ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SUMA	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SUMA	∑mg L ⁻¹ , ∑mmoles	RSE mg L ⁻¹	Error %
	meq L ⁻¹														
MEDIA	7.5	523.88	1.62	1.50	3.33	0.36	5.09	0.26	3.31	2.34	0.69	8.18		339	1.51
			20.79	13.87	63.61	8.71		3.23	159.92	67.1	15.71		351.8		
			0.53	0.52	2.70	0.21		0.05	2.62	1.89	0.16		8.79		
MEDIANA	7.5	325	1.42	1.20	1.52	0.34	3.18	0.00	2.45	2.00	0.36	3.27		208	1.51
			17.03	10.94	31.97	6.65		0.00	105.53	43.6	8.65		217.5		
			0.43	0.43	1.39	0.16		0.00	1.73	1.23	0.09		5.5		
MODA	7.6	281	N/A	N/A	1.02	0.16	1.98	0.00	1.73	N/A	N/A	N/A		N/A	1.64
			28.46	9.48	42.09	6.26		0.00	92.72	34.03	7.68		N/A		
			0.27	0.39	1.02	0.16		0.00	1.52	0.96	0.08		N/A		
DESV. EST.	0.48	492.1	0.99	0.75	3.87	0.29	4.77	0.65	1.88	1.48	1.22	24.9		431	0.21
			15.5	10.79	91.65	7.69		12.95	146.3	63.73	30.02		332.3		
			0.39	0.36	3.90	0.18		0.22	2.39	1.79	0.31		8.72		
VARIANZA	0.23	242242	0.99	0.56	15.05	0.08	22.79	0.42	3.53	2.20	1.50	620		18577	0.04
			240.4	116.55	8401.2	59.17		167.9	21421	4062.5	901.2		110426		
			0.15	0.13	15.88	0.03		0.04	5.75	3.23	0.09		76		
RANGO	2.4	2445	3.75	2.82	12.69	1.13	23.68	1.86	5.49	4.22	4.56	192.6		2976	0.92
			75.15	58.86	513.3	48.1		66.0	807	319.7	225.2		1666		
			1.88	1.76	22.32	1.23		1.12	13.23	9.02	2.35		44		
MÍNIMO	6.7	40	0.04	0.18	0.36	0.12	0.39	0.00	1.32	0.74	0.12	0.38		34	1.05
			0.80	1.22	2.99	0.78		0.00	13.42	4.96	0.96		27.14		
			0.02	0.05	0.13	0.02		0.00	0.22	0.14	0.01		0.64		
MÁXIMO	9.1	2485	3.79	3	13.05	1.25	24.07	1.86	6.81	4.96	4.71	193		3010	1.97
			75.95	60.08	516.35	48.88		66.0	820.4	324.7	226.2		27.14		
			1.9	1.81	22.45	1.25		1.12	13.45	9.16	2.36		44.65		

Cuadro 16. Análisis estadístico de las aguas con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

	pH	CE μS cm ⁻¹	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	SUMA	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	SUMA	Σmg L ⁻¹ , Σmmoles	RSE mg L ⁻¹	Error %
MEDIA	8.5	18500	2.02	36.98	131.47	7.80	180.38	10.0	33.87	109.87	21.35	175.27		15729	1.43
			82.03	454.11	3056.4	301.7		300	2045	3948.4	1070.7		11134		
			2.02	18.94	132.8	7.76		5.00	33.33	112.01	10.74		323.4		
MEDIANA	8.6	8.6	0.55	28.86	84.31	7.29	125.89	6.98	26.84	67.02	12.52	122.64		9152	1.34
			22.04	350.65	1939.1	261		209.4	1637.2	2375.2	601.3		7660.5		
			0.55	14.43	84.31	7.00		3.49	26.84	67.02	6.26		217.2		
MODA	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.00	N/A	N/A	N/A	N/A		N/A	1.31
			N/A	N/A	N/A	N/A		0.00	N/A	N/A	N/A		N/A		
			N/A	N/A	N/A	N/A		0.00	N/A	N/A	N/A		N/A		
DESV. EST.	0.88	17655	2.35	52.23	123.64	5.54	172.57	11.26	14.33	147.01	22.58	168.40		13499	0.18
			95.57	646.8	2920	217.54		337.9	878.9	5350.2	1188.1		10098		
			2.35	27.27	126.9	5.55		5.63	14.54	152.5	11.45		314.8		
VARIANZA	0.78	312416667	5.52	2728.19	15289	30.79	29782	126.87	205.37	21612	510.05	28358		182227310	0.03
			9134	418357	8528742	47326		114190	772476	28625330	1411747		101986822		
			5.52	744	16105	30.85		31.71	211.51	23275	131.18		99102		
RANGO	2.1	51000	5.75	149.72	349.16	16.32	498.5	28.62	35.86	416.93	61.10	486.25		36406	0.44
			235.6	1852.7	8258	638.1		858.6	2156.9	15154	3250.6		28899		
			5.75	78.06	358.8	16.32		14.31	35.86	431.9	31.05		903.7		
MÍNIMO	7.6	5000	0.01	0.68	30.14	3.22	48.42	0.00	21.18	19.07	3.90	46.75		3482	1.31
			0.4	8.26	693.2	125.9		0.00	1322.4	676	187.3		3382		
			0.01	0.34	30.14	3.22		0.00	21.18	19.07	1.95		89.3		
MÁXIMO	9.7	56000	5.76	150.4	379.3	19.54	547.0	28.62	57.04	436	65.0	533.0		39888	1.75
			236	1861	8952	125.9		858.6	3479.4	15831	3438		32282		
			5.76	78.4	389	19.54		14.31	57.04	451	33.0		993.0		

6.4. COMPROBACIÓN DE LA EXACTITUD DE LOS DATOS ESTUDIADOS

La comprobación de los datos analizados se efectuó con la siguiente fórmula:

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

La $CE_{\text{calculada}}$ se obtiene de la gráfica de la conductividad eléctrica en función de la suma de aniones cationes en mmolc L^{-1} , la CE_{medida} es el promedio de las mediciones en cada punto de muestreo.

Cuadro 17. Factores de conductividad eléctrica de los iones que frecuentemente se encuentran en las aguas.

Ion	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$ de (meq L^{-1})	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$ de (mg L^{-1})
Ca ²⁺	52.0	2.60
Mg ²⁺	46.6	3.82
Na ⁺	48.9	2.13
K ⁺	72.0	1.84
CO ₃ ²⁻	54.6	2.82
HCO ₃ ³⁻	43.6	0.71
Cl ⁻	75.9	2.14
SO ₄ ²⁻	73.9	1.54

Conductividades eléctricas medidas a 25°C.

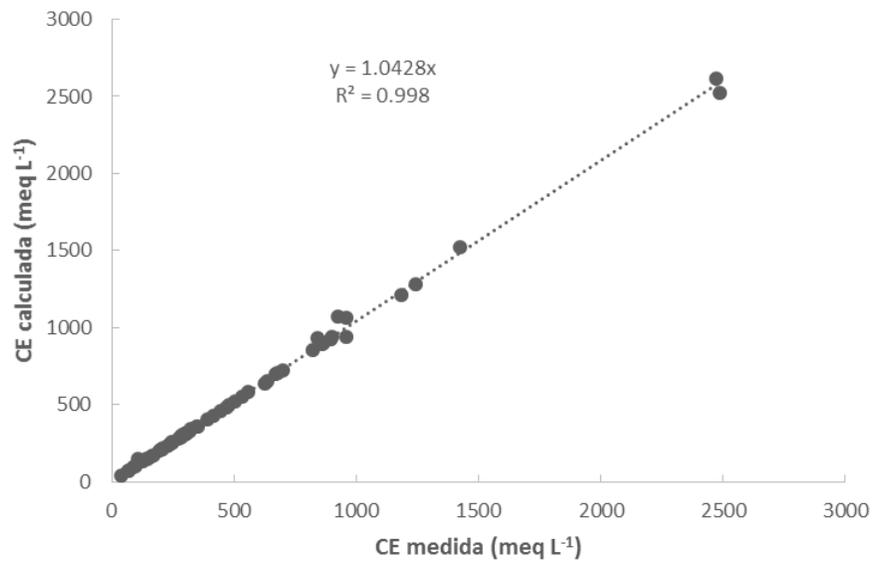


Figura 5. Conductividad eléctrica medida (meq L⁻¹) y conductividad eléctrica calculada (meq L⁻¹) de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

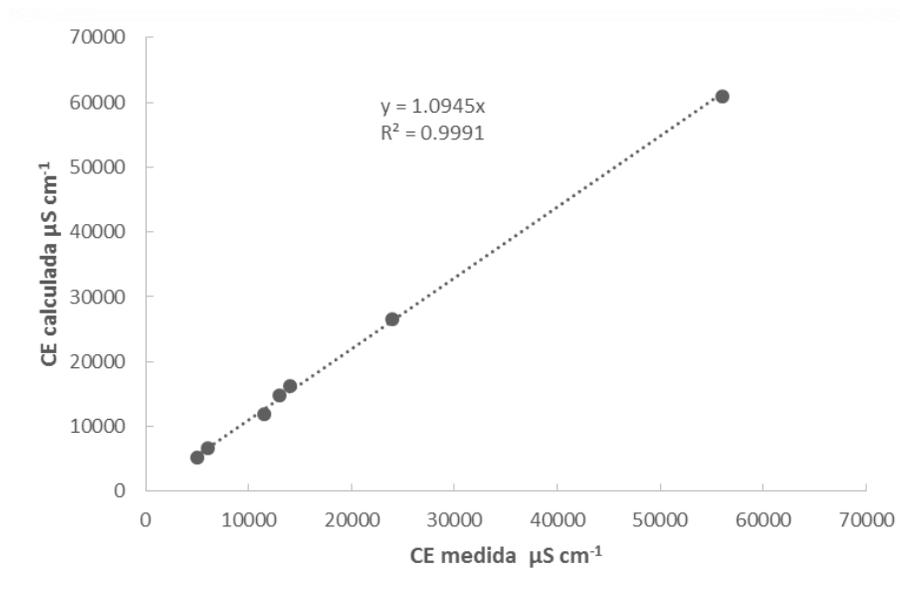


Figura 6. Conductividad eléctrica medida (meq L⁻¹) y conductividad eléctrica calculada (meq L⁻¹) de las aguas con conductividad eléctrica elevada de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

6.5. DISTRIBUCIÓN DE CATIONES Y ANIONES

La distribución de aniones y cationes se muestran en las (figuras 7-10), se observa la predominancia de cada ion en el recorrido de muestreo, tanto del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz y de las muestras con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

En las aguas del bosque de niebla el ion sodio (Na^+) presenta valores elevados en las muestras del maar Preciosa de Puebla 22.45 meq L^{-1} y el rio Apulco de Veracruz 16.9 meq L^{-1} . Así mismo, también en estas muestras el ion, (HCO_3^-) tiene alta concentración de 11.02 meq L^{-1} y 13.45 meq L^{-1} respectivamente. Esta particularidad de la composición química de las aguas, indica que de acuerdo al quimismo estas aguas tienen una gran proporción de iones bicarbonato (HCO_3^-).

Analizando las gráficas de las muestras con conductividades eléctricas elevadas se puede observar, en el caso de los aniones la dominancia del ion (Na^+), en la muestra de la playa Miramar $379.34 \text{ meq L}^{-1}$ y la laguna de Totolcingo $211.61 \text{ meq L}^{-1}$. En las muestras anteriores el ion cloro tiene valores de 436.8 meq L^{-1} y $108.12 \text{ meq L}^{-1}$. Esto debido a las vías evolutivas geoquímicas que adquieren las aguas durante los procesos de evaporación. Además las variaciones de sodio y bicarbonato se deben a las descargas de aguas residuales de las poblaciones cercanas.

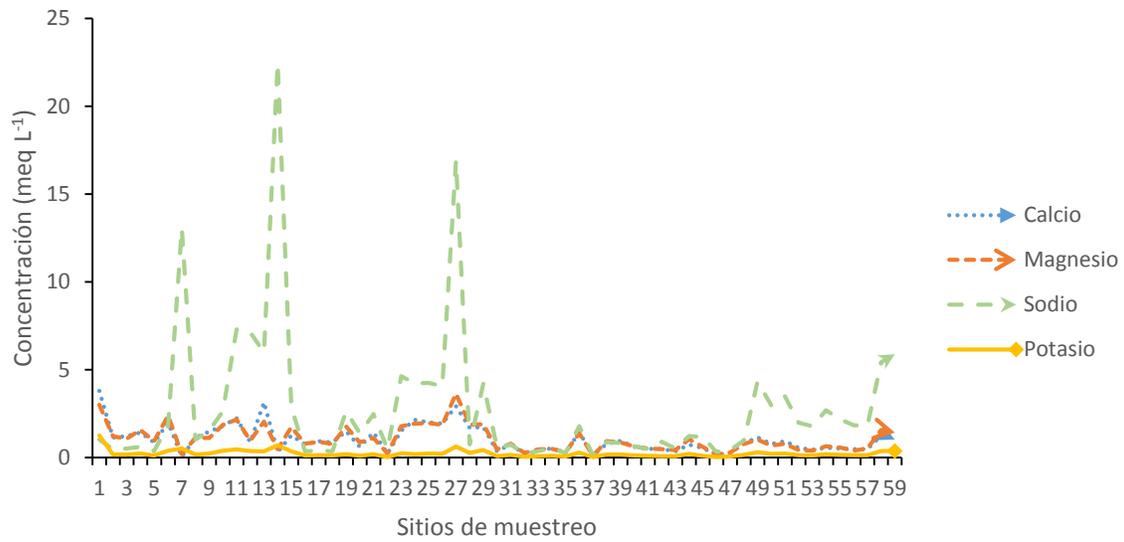


Figura 7. Composición de cationes de las aguas muestreadas en el bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

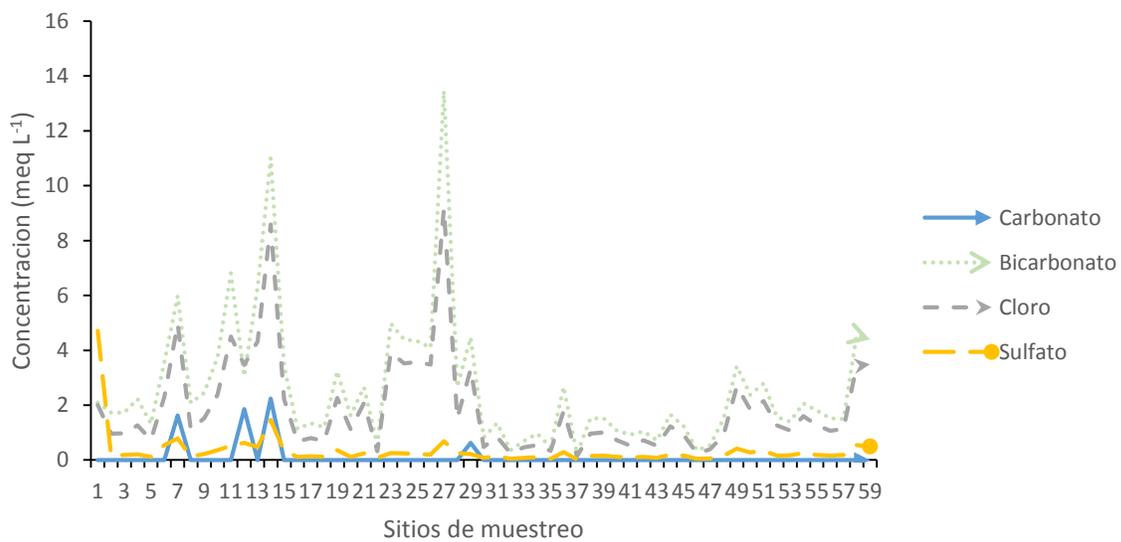


Figura 8. Composición de aniones de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

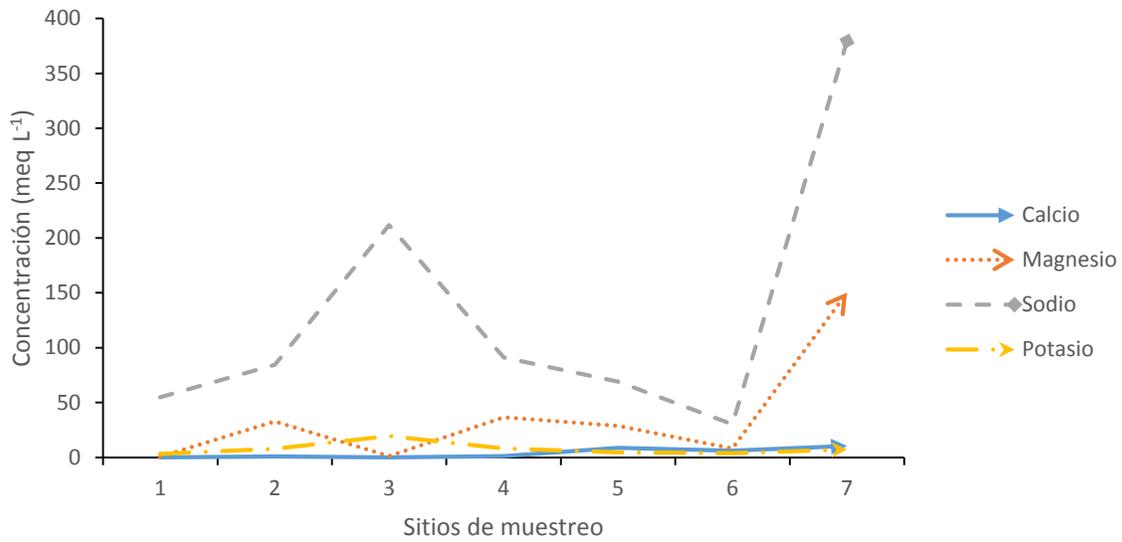


Figura 9. Composición de cationes de las aguas muestreadas con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

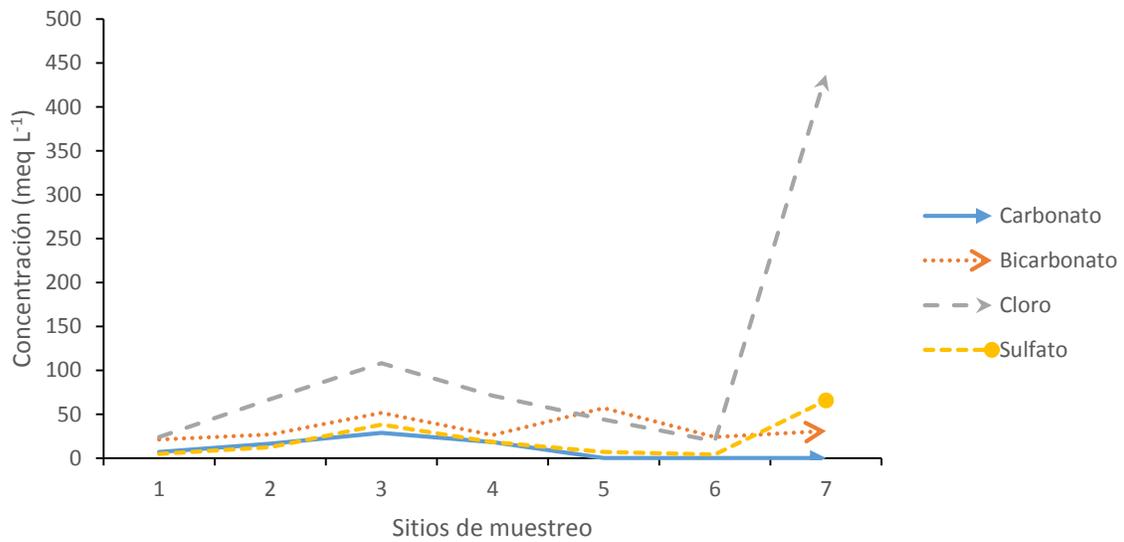


Figura 10. Composición de aniones de las aguas muestreadas con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

6.6. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La calidad del agua de riego, fundamentalmente está predeterminada por la concentración total electrolítica y por la composición relativa de los diferentes iones.

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 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

En la cuenca Oriental, existe material altamente permeable en las zonas bajas que favorecen la infiltración inmediata de los escurrimientos pluviales lo que origina que el patrón de drenaje superficial hacia las partes bajas sea prácticamente inexistente (Rodríguez y Escolero, 2004).

En las (figuras 11 y 12) se presenta la distribución de frecuencias de las diferentes aguas naturales del bosque de niebla y de las muestras con conductividades eléctricas elevadas, con respecto a su conductividad eléctrica (en $\mu\text{S cm}^{-1}$). Así como su análisis estadístico de frecuencias en los (cuadros 18 y 19).

Se puede observar que 50.84% de las muestras del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz, están en el intervalo estadístico de conductividad eléctrica ($40\text{-}346 \mu\text{S cm}^{-1}$). Mientras que 3.30% de las muestras se encuentran en el intervalo de ($2177\text{-}2485 \mu\text{S cm}^{-1}$). Las conductividades eléctricas más bajas son de aguas de escurrimientos superficiales y que fluyen debido al gradiente altitudinal (Mendoza, 2009).

Las frecuencias de las muestras con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas, presentan el 72.0% de las muestras en el intervalo de ($5000\text{-}17500 \mu\text{S cm}^{-1}$), pertenecientes a los sitios de muestreo de: maar Tecuítlapa, maar Atexcac, maar Alchichica, río Tuxpan y río Pánuco. La muestra de la laguna de Totolcingo, de la cuenca Oriental, se encuentra en el intervalo de ($17751\text{-}30500 \mu\text{S cm}^{-1}$). En el trabajo de análisis de agua de (Can,

2011) de la cuenca Oriental, reporta valores de conductividad eléctrica de 250-750 $\mu\text{S cm}^{-1}$ o C2, en 16 muestra, representando el 37.2% de las muestras.

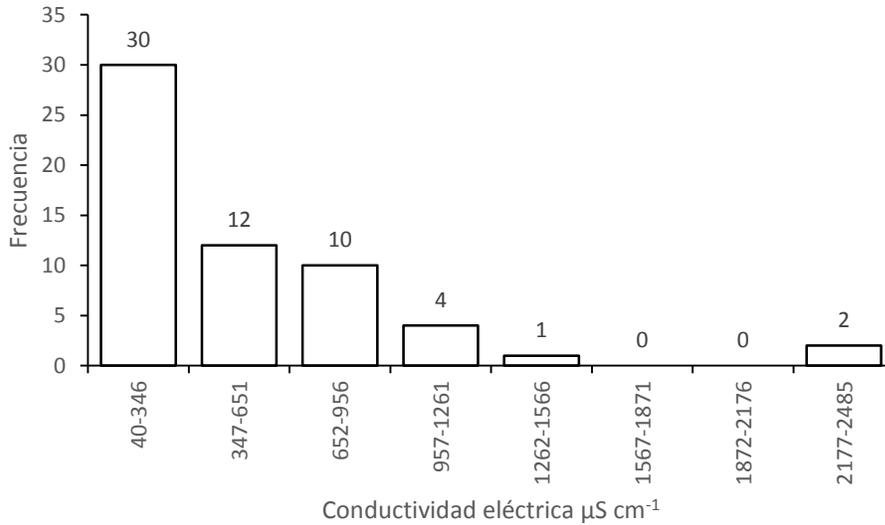


Figura 11. Distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Cuadro 18. Análisis estadístico de la frecuencia de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Intervalos de clase		Marca de clase	fi	Fi	hi	f%
Lim inf	Lim sup					
40	346	193	30	30	0.50	50.84
347	651	499	12	42	0.20	20.33
652	956	804	10	52	0.16	16.94
957	1261	1109	4	56	0.06	6.77
1262	1566	1414	1	57	0.01	1.69
1567	1871	1719	0	57	0	0
1872	2176	2024	0	57	0	0
2177	2485	2331	2	59	0.03	3.38
Σ			59		1	100

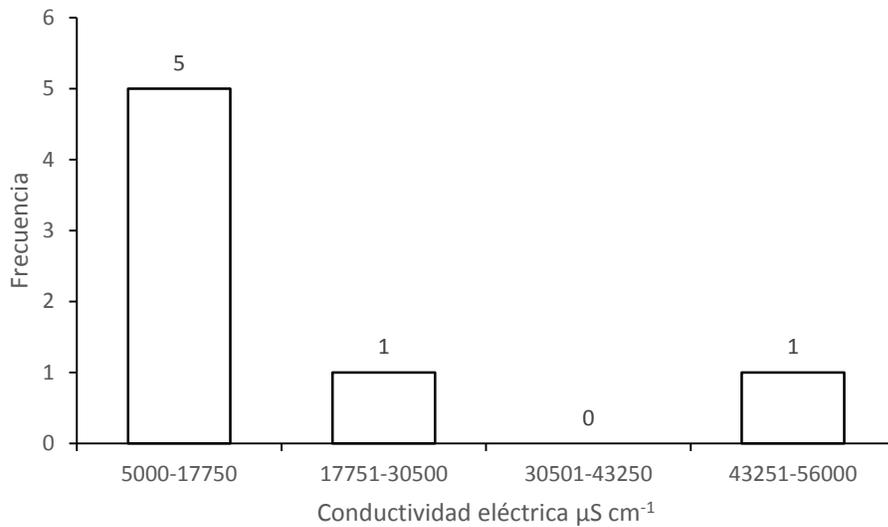


Figura 12. Distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de las muestras con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

Cuadro 19. Análisis estadístico de la frecuencia de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de las muestras con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

Intervalos de clase		Marca de clase	f_i	F_i	h_i	$f\%$
Lim inf	Lim sup					
5000	17750	11375	5	5	0.72	72
17751	30500	24125.5	1	6	0.14	14
30501	43250	36875.5	0	6	0	0
43251	56000	49625.5	1	7	0.14	14
Σ			7		1	100

6.7. RELACIÓN DE LOS SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS Y LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La conductividad eléctrica se utiliza para indicar la concentración total de componentes disociados en las aguas, con ello se tiene una aproximación al contenido de sólidos totales disueltos (STD). Para comprobar los resultados analíticos obtenidos (Richards *et al*, 1982) propuso un valor numérico, del cociente de dividir los sólidos totales disueltos en mg L^{-1} entre la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$, debe ser aproximadamente 0.640, los residuos sólidos disueltos al igual que la conductividad eléctrica son estimadores cuantitativos de la concentración total de sales disueltas en las aguas para riego.

En este estudio se observó la relación de los sólidos totales disueltos y la conductividad eléctrica de las muestras del bosque de niebla (cuadro 13) 0.561 y $R^2= 0.970$, para las aguas con conductividades elevadas (cuadro 14) fue de 0.727 y $R^2= 0.939$, ambos parámetros están dentro del rango de aceptabilidad que según (Ramírez, 2007), el valor recomendado para verificar los resultados es de 0.64, pero puede variar de 0.550 a 0.750 dependiendo del tipo de sal.

Los diferentes parámetros de contenidos de sales solubles en aguas de riego y las soluciones acuosas, son directamente proporcional con respecto a la conductividad eléctrica (mS cm^{-1}) y los sólidos totales disueltos (STD). Los daños en las plantas son variables según el tipo de sal y concentración.

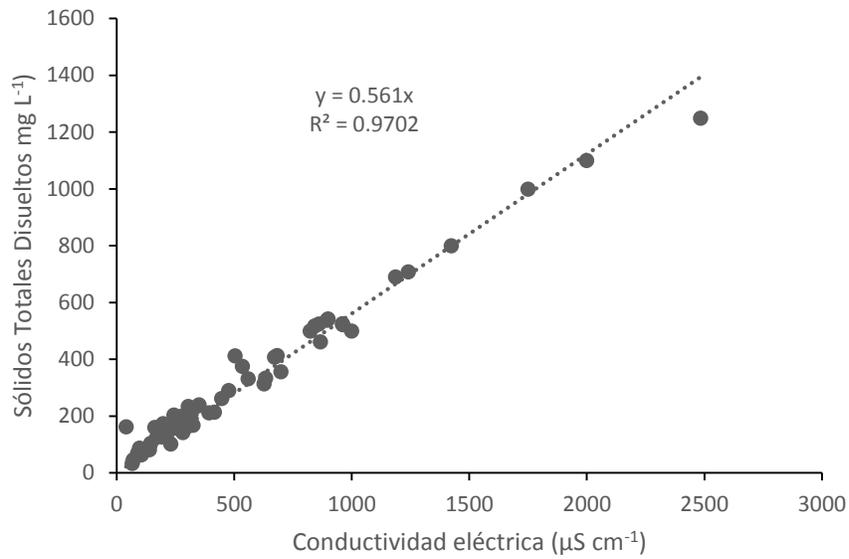


Figura 13. Relación de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y la concentración de sólidos totales disueltos (mg L^{-1}) de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

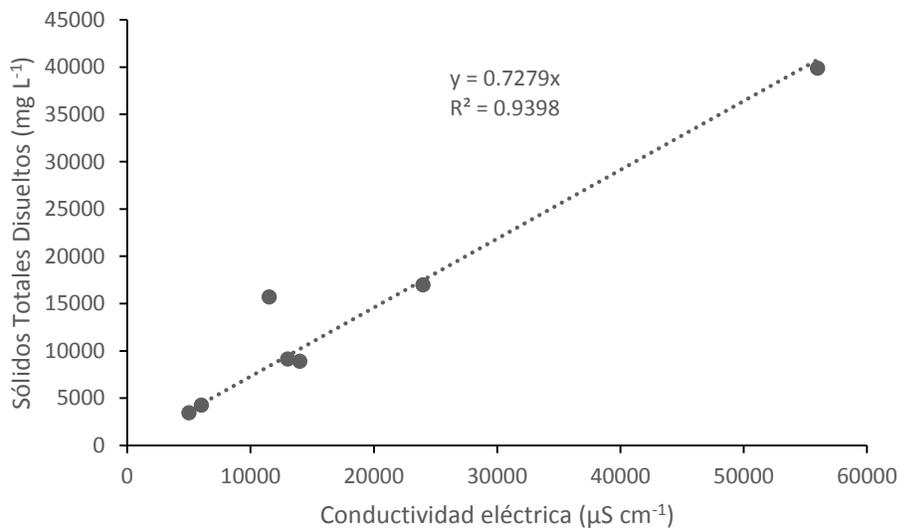


Figura 14. Relación de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y la concentración de sólidos totales disueltos (mg L^{-1}) de las aguas con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

6.8. PRESIÓN OSMÓTICA

La relación entre presión osmótica y conductividad eléctrica es muy útil con fines agrícolas, pues dentro de los valores de la conductividad eléctrica que permite el desarrollo de las plantas, (Richards *et al*, 1982), la relación $PO = (0.36CE)/1000$ donde:

PO: presión osmótica en atm

CE: conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$

Puede usarse para calcular la presión osmótica a partir de las determinaciones de la CE.

Los resultados del muestreo del bosque de niebla, se observan en la (figura 15), estos indican que el valor mínimo es de 0.0156 atm correspondiente al escurrimiento Atzalan y el valor máximo es de 1.0923 atm del maar la Preciosa en la cuenca Oriental, obteniendo un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.993$ y la ecuación de regresión lineal es $PO \text{ atmosfera estimada} = 0.0004X * PO \text{ atmosfera calculada}$.

En la (figura 16), se presenta la regresión lineal de las aguas con CE: $PO \text{ atmosfera estimada} = 0.0004X * PO \text{ atmosfera calculada}$, $R^2 = 0.999$, en estas muestras existen CE altas por lo tanto hay presiones osmóticas elevadas, como la muestra de la playa Miramar=24.55 atm y CE=56000 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

La publicación de (Can, 2011) se asemeja a la de este trabajo, señala una ecuación de regresión lineal de conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) contra presión osmótica (atm) de $y = 0.004X$ y el coeficiente de determinación de $R^2 = 0.998$, en 42 muestras de la cuenca Oriental, Puebla. Ayers y Westcot (1987) explican que prácticamente todos los cultivos pueden alcanzar su máximo rendimiento cuando las aguas de riego presentan una presión osmótica menor a 0.25 atm o una conductividad eléctrica $< 700 \mu\text{S cm}^{-1}$, sin embargo, pueden utilizarse aguas con presión osmótica entre 0.25 y 1.00 atm o 700 a 3000 $\mu\text{S cm}^{-1}$, siempre y cuando se mantenga la salinidad de los suelos dentro del rango de tolerancia de los cultivos.

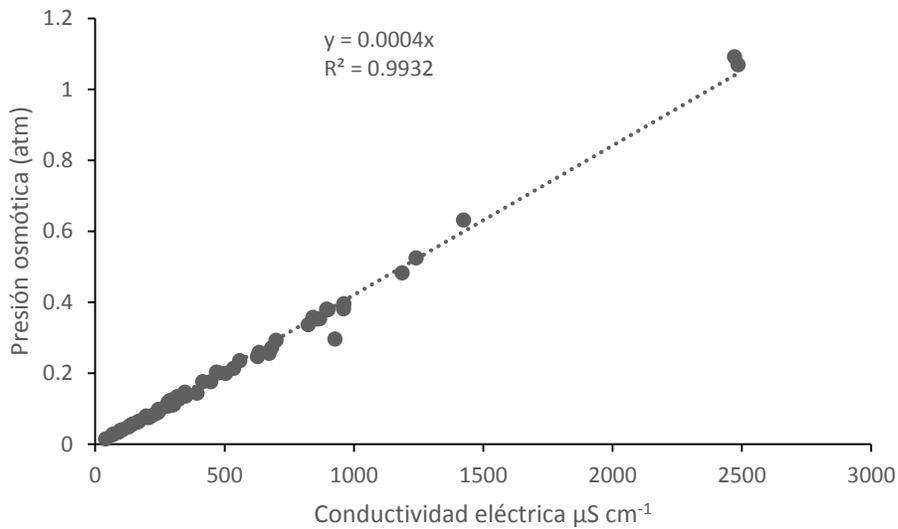


Figura 15. Relación de la conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$ y la presión osmótica (atm), de las muestras del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

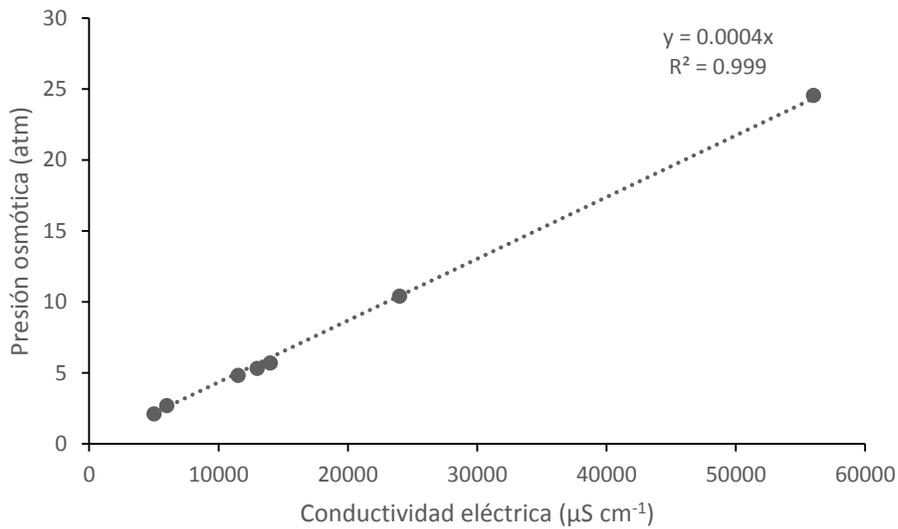


Figura 16. Relación de la conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$ y la presión osmótica (atm), de las muestras con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

6.9. SALINIDAD EFECTIVA

La salinidad efectiva mide el efecto de las sales solubles cuando pasan a formar parte de la solución del suelo. Este indicador es más intenso cuando el agua tiene mayor contenido de bicarbonatos (HCO_3^-) y carbonatos (CO_3^{2-}) (Jaimes, 2010). Las aguas del bosque de niebla, se nota en el (cuadro 20), que 40 muestras son aceptables, 18 están condicionadas y una no es recomendable (maar la Preciosa SE=23.14), para el riego agrícola, es decir, la mayor parte son buenas.

Al concentrarse las sales hasta alcanzar algunas de ellas su nivel de máxima solubilidad, pueden precipitar y retirar de la solución del suelo determinados cationes, como calcio y magnesio, lo que alterará las proporciones iónicas iniciales (Mancilla, 2012). Mientras que las aguas con conductividades eléctricas elevadas (cuadro 21) presentan todos sus valores de salinidad efectiva mayores a 15, por lo que son no recomendables para el riego agrícola. Las aguas que presentan mayor contenido de carbonatos, que calcio y magnesio, traen como consecuencia un aumento de la concentración de sodio en el agua del suelo (Mendoza, 2009).

Cuadro 20. Salinidad efectiva y clasificación de las muestras de agua del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Salinidad efectiva (meq L-1)	Clase	Muestras
<3	Buena	40
3 a 15	Condicionada	18
>15	No recomendable	1

Cuadro 21. Salinidad efectiva y clasificación de las muestras de agua con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

Salinidad efectiva (meq L-1)	Clase	Muestras
<3	Buena	0
3 a 15	Condicionada	0
>15	No recomendable	7

Cuadro 22. Salinidad efectiva y valoración de las muestras del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Muestra	SE	Valoración	Muestra	SE	Valoración
1	5.27	Condicionada	31	1.04	Buena
2	1.21	Buena	32	0.32	Buena
3	1.24	Buena	33	0.57	Buena
4	1.58	Buena	34	0.69	Buena
5	0.93	Buena	35	0.39	Buena
6	3.31	Condicionada	36	2.21	Buena
7	13.57	Condicionada	37	0.17	Buena
8	1.34	Buena	38	1.2	Buena
9	1.88	Buena	39	1.26	Buena
10	3.01	Condicionada	40	0.91	Buena
11	7.74	Condicionada	41	0.65	Buena
12	7.48	Condicionada	42	0.98	Buena
13	6.32	Condicionada	43	0.63	Buena
14	23.14	No Recomendable	44	1.52	Buena
15	3.2	Condicionada	45	1.27	Buena
16	0.85	Buena	46	0.34	Buena
17	1.02	Buena	47	0.48	Buena
18	0.88	Buena	48	1.18	Buena
19	2.83	Buena	49	4.61	Condicionada
20	1.49	Buena	50	3.17	Condicionada
21	2.65	Buena	51	1.71	Buena
22	0.51	Buena	52	2.11	Buena
23	6.09	Condicionada	53	1.9	Buena
24	4.41	Condicionada	54	2.86	Buena
25	4.46	Condicionada	55	2.32	Buena
26	4.27	Condicionada	56	1.96	Buena
27	23.38	Condicionada	57	1.93	Buena
28	1.9	Buena	58	5.78	Condicionada
29	4.62	Condicionada	59	6.23	Condicionada
30	0.62	Buena			

Cuadro 23. Salinidad efectiva y valoración de las muestras con conductividad eléctrica elevada de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

Muestra	SE	Valoración
1	57.97	No Recomendable
2	92.07	No Recomendable
3	231.15	No Recomendable
4	99.31	No Recomendable
5	73.81	No Recomendable
6	34.04	No Recomendable
7	386.63	No Recomendable

6.10. SALINIDAD POTENCIAL

Como se puede apreciar en el (cuadro 24) 45 muestras del bosque de niebla se encuentra en el rango de <3, por lo que según la metodología se clasifica como: Aguas buenas para el riego y 14 muestras son condicionadas para el riego, debe mantenerse control sobre el comportamiento químico del suelo. (Gutiérrez y García, 1954).

En las muestras con conductividades elevadas (cuadro 25) se observa que el total de muestras, son no recomendables para el riego, pues los valores de salinidad potencial son mayores a 7. El peligro de salinidad por cloruros en el agua no puede predecirse en forma general y debe determinarse para un suelo y un cultivo específico, por tanto este índice debe ser verificado para cultivos y suelos dados de la misma forma, que para suelos de baja permeabilidad.

Este índice considera que se produce la precipitación de las sales menos solubles, quedando en solución los cloruros y sulfatos, con lo que aumenta considerablemente la presión osmótica. (Fernández, 1997).

Cuadro 24. Salinidad potencial y clasificación de las muestras de agua del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Salinidad Potencial (meq L⁻¹)	Clase	Muestras
<3	Buena	45
3 a 15	Condicionada	14
>15	No recomendable	0

Cuadro 25. Salinidad potencial y clasificación de las muestras de agua con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

Salinidad Potencial (meq L⁻¹)	Clase	Muestras
<3	Buena	0
3 a 15	Condicionada	0
>15	No recomendable	7

Cuadro 26. Salinidad potencial y valoración de las muestras del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Muestra	SP	Valoración	Muestra	SP	Valoración
1	4.36	Condicionada	31	0.91	Buena
2	1.04	Buena	32	0.28	Buena
3	1.06	Buena	33	0.50	Buena
4	1.37	Buena	34	0.59	Buena
5	0.80	Buena	35	0.35	Buena
6	2.57	Buena	36	1.93	Buena
7	5.36	Condicionada	37	0.15	Buena
8	1.19	Buena	38	1.04	Buena
9	1.63	Buena	39	1.09	Buena
10	2.56	Buena	40	0.78	Buena
11	4.76	Condicionada	41	0.57	Buena
12	3.78	Condicionada	42	0.78	Buena
13	4.56	Condicionada	43	0.56	Buena
14	9.31	Condicionada	44	1.33	Buena
15	2.40	Buena	45	1.00	Buena
16	0.74	Buena	46	0.26	Buena
17	0.87	Buena	47	0.42	Buena
18	0.75	Buena	48	0.98	Buena
19	2.44	Buena	49	2.90	Buena
20	1.18	Buena	50	1.98	Buena
21	2.20	Buena	51	2.32	Buena
22	0.36	Buena	52	1.34	Buena
23	4.05	Condicionada	53	1.17	Buena
24	3.65	Condicionada	54	1.73	Buena
25	3.68	Condicionada	55	1.37	Buena
26	3.58	Condicionada	56	1.15	Buena
27	9.50	Condicionada	57	1.23	Buena
28	1.65	Buena	58	3.70	Condicionada
29	3.43	Condicionada	59	3.74	Condicionada
30	0.52	Buena			

Cuadro 27. Salinidad potencial y valoración de las muestras con conductividad eléctrica elevada de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

Muestra	SP	Valoración
1	26.54	No Recomendable
2	73.28	No Recomendable
3	127.18	No Recomendable
4	80.07	No Recomendable
5	47.25	No Recomendable
6	21.02	No Recomendable
7	436.88	No Recomendable

6.11. CLASIFICACIÓN DE ACUERDO A LA RELACIÓN DE ADSORCIÓN DE SODIO

Los iones de sodio en las aguas analizadas provienen además de los procesos industriales donde se utilizan algunas cantidades de carbonato de sodio y de sulfato de sodio. En estas aguas se presentan cantidades importantes de bicarbonatos que son fácilmente hidrolizables, lo que genera que el pH aumente.

Las clasificaciones con respecto a la sodicidad y CE se muestran en las (figuras 23-25), presentan en su mayor parte la clasificación S1, en el muestreo del bosque de niebla y las S3 y S4 para las muestras con conductividades elevadas.

En los (cuadros 28 y 29) se compara el estudio de (Mancilla, 2012) y el de este trabajo, ambos trabajos, tienen muestras en la cuenca la Oriental de Puebla, Tlaxcala y Veracruz, los porcentajes de ambos trabajos en la clasificación S1 para las tres relaciones de sodio, son similares (86-95 %). Cuando las aguas de los cauces fluviales de los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz, son utilizadas para riego, alcanzan un equilibrio con los cationes adsorbidos de los sistemas coloidales de los suelos.

Cuadro 28. Resultados del presente trabajo, de la clasificación S1, de la cuenca Oriental.

Muestreo	Número de muestras de RAS	%	Número de muestras de RASaj	%	Número de muestras de RAS°	%
Bosque de niebla	57	96.61	55	93.22	56	94.91

Cuadro 29. Resultados de (Mancilla, 2012), de la clasificación S1, de la cuenca Oriental.

Muestreo	Número de muestras de RAS	%	Número de muestras de RASaj	%	Número de muestras de RAS°	%
2009	78	87.71	79	86.81	79	86.81
2010	77	91.16	74	88.09	77	91.16

La variabilidad en resultados, se puede deber a diferencias en la cantidad y tipo de arcillas y también puede ser debido al tipo de aniones acompañantes y a la solubilidad de compuestos presentes en los suelos, sin que pueda descartarse efectos del clima (Rhoades, 1968).

En las (figuras 17-22) se muestran las dispersiones de los valores de las relaciones de adsorción de sodio, explícito, ajustado y corregido. La relación entre RAS y RASaj en el muestreo del bosque de niebla es de 1.433 y $R^2= 0.939$, para RAS y RAS° es de 1.160 y $R^2=0.964$. En las aguas con conductividades elevadas la relación de RAS y RASaj es de 1.204 y $R^2=0.953$, para RAS y RAS° el valor es 0.926 y $R^2=0.997$, no existe diferencias significativas entre RASaj y RAS°, debido a la concentración de iones, las aguas bicarbonatadas modifican los valores de RAS, causado por los procesos de hidrólisis y precipitación de calcio, en el caso de RAS° pudiera ser la mejor opción de evaluación (Velásquez *et al*, 2002).

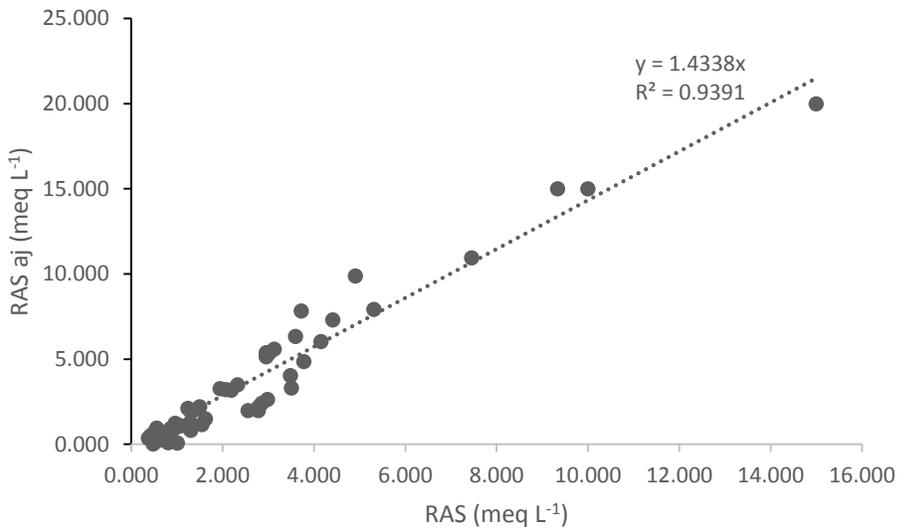


Figura 17. Dispersión de los valores de RAS y RAS ajustado (meq L⁻¹), de las muestras del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

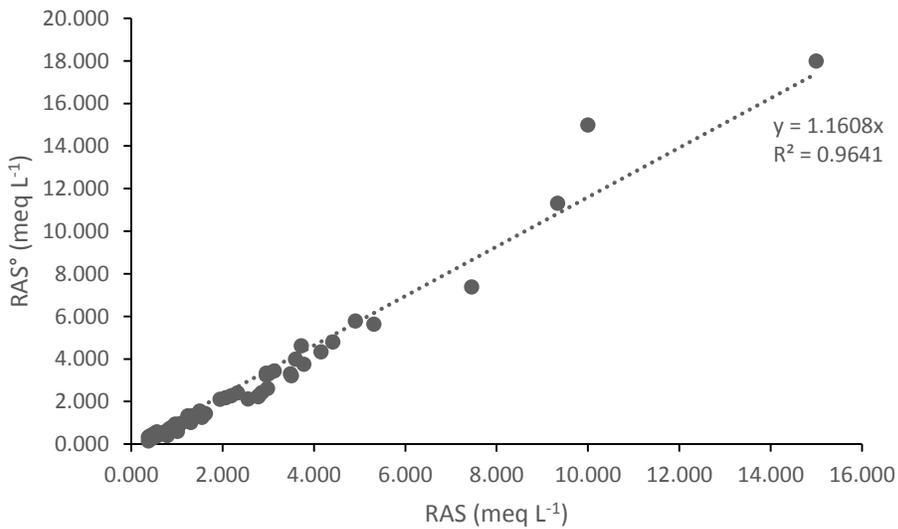


Figura 18. Dispersión de los valores de RAS y RAS° (meq L⁻¹), de las muestras del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

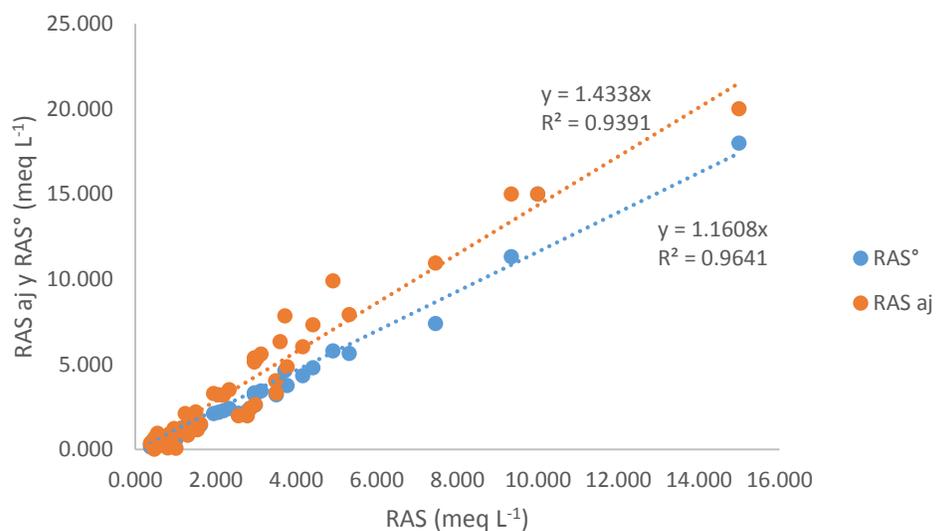


Figura 19. Dispersión de los valores de RAS con RASaj y RAS° (meq L⁻¹), de las muestras del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

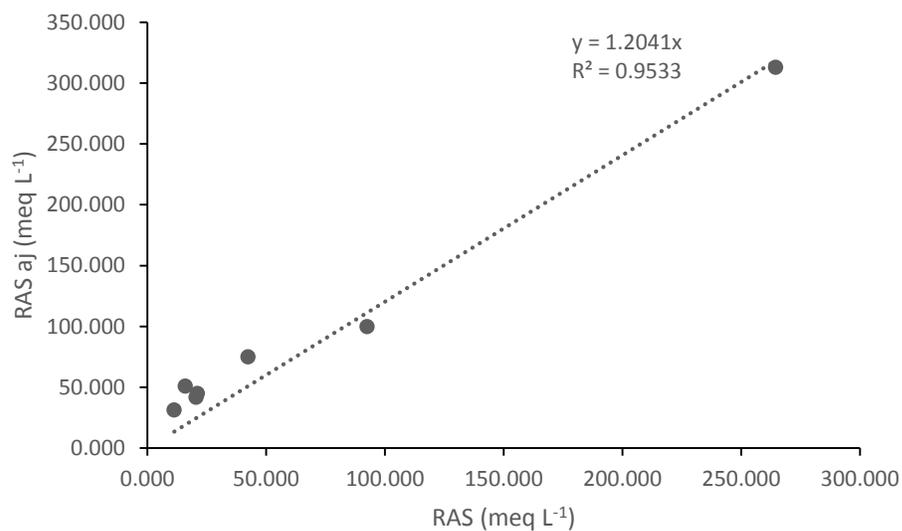


Figura 20. Dispersión de los valores de RAS y RAS aj de las muestras con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

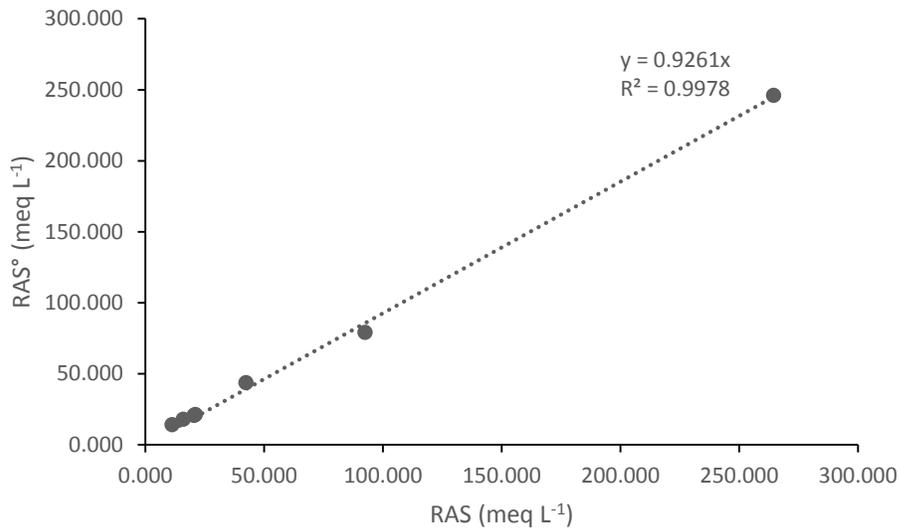


Figura 21. Dispersión de los valores de RAS y RAS° de las muestras con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

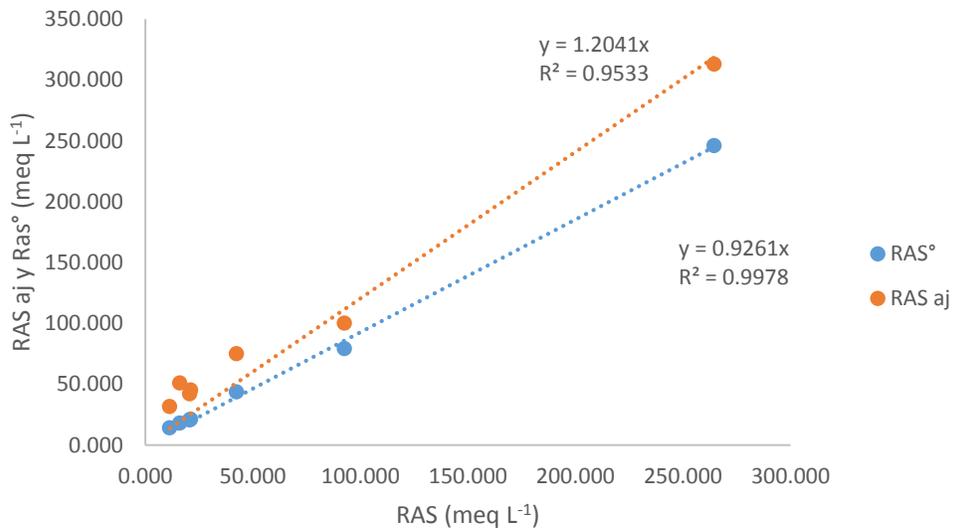


Figura 22. Dispersión de los valores de RAS con RAS° y RAS aj de las muestras con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

Cuadro 30. Valores y clasificación de acuerdo a la sodicidad y conductividad eléctrica de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Muestra	RAS	Tipo	RASaj	Tipo	RAS °	Tipo
1	0.554	S1-C3	0.962	S1-C3	0.575	S1-C3
2	0.427	S1-C2	0.516	S1-C2	0.4	S1-C2
3	0.486	S1-C2	0.605	S1-C2	0.463	S1-C2
4	0.491	S1-C2	0.689	S1-C2	0.489	S1-C2
5	0.383	S1-C1	0.379	S1-C1	0.334	S1-C1
6	1.239	S1-C2	2.121	S1-C2	1.335	S1-C2
7	39.347	S4-C3	10.847	S2-C3	27.211	S4-C3
8	0.962	S1-C2	1.239	S1-C2	0.949	S1-C2
9	1.336	S1-C2	1.943	S1-C2	1.333	S1-C2
10	1.944	S1-C2	3.286	S1-C2	2.106	S1-C2
11	4.908	S1-C3	9.895	S2-C3	5.792	S1-C3
12	7.454	S1-C3	10.949	S2-C3	7.393	S1-C3
13	3.719	S1-C3	7.841	S1-C3	4.627	S1-C3
14	35.497	S4-C4	48.131	S4-C4	36.419	S4-C4
15	2.331	S1-C2	3.509	S1-C2	2.404	S1-C2
16	0.401	S1-C1	0.347	S1-C1	0.334	S1-C1
17	0.429	S1-C1	0.444	S1-C1	0.381	S1-C1
18	0.378	S1-C1	0.359	S1-C1	0.326	S1-C1
19	2.071	S1-C2	3.224	S1-C2	2.185	S1-C2
20	1.621	S1-C2	1.495	S1-C2	1.434	S1-C2
21	2.187	S1-C2	3.192	S1-C2	2.274	S1-C2
22	1.012	S1-C1	0.085	S1-C1	0.605	S1-C1
23	3.597	S1-C3	6.343	S1-C3	3.991	S1-C3
24	2.958	S1-C3	5.381	S1-C3	3.331	S1-C3
25	3.017	S1-C3	5.372	S1-C3	3.326	S1-C3
26	2.953	S1-C3	5.141	S1-C3	3.24	S1-C3
27	9.339	S1-C4	21.709	S3-C4	11.317	S2-C4
28	0.562	S1-C2	0.871	S1-C2	0.579	S1-C2
29	3.126	S1-C3	5.6	S1-C3	3.435	S1-C3
30	0.87	S1-C1	0.35	S1-C1	0.648	S1-C1
31	0.823	S1-C1	0.777	S1-C1	0.709	S1-C1
32	0.426	S1-C1	-0.088	S1-C1	0.243	S1-C1
33	0.578	S1-C1	0.206	S1-C1	0.414	S1-C1
34	0.739	S1-C1	0.491	S1-C1	0.567	S1-C1
35	0.477	S1-C1	0.03	S1-C1	0.298	S1-C1
36	1.499	S1-C2	2.206	S1-C2	1.558	S1-C2
37	0.375	S1-C1	-0.194	S1-C1	0.153	S1-C1
38	0.949	S1-C2	0.938	S1-C2	0.849	S1-C2
39	0.864	S1-C2	0.94	S1-C2	0.768	S1-C2
40	0.819	S1-C1	0.614	S1-C1	0.658	S1-C1
41	0.675	S1-C1	0.419	S1-C1	0.525	S1-C1

Cuadro 30...

Muestra	RAS	Tipo	RASaj	Tipo	RAS °	Tipo
42	1.306	S1-C1	0.838	S1-C1	1.019	S1-C1
43	0.827	S1-C1	0.288	S1-C1	0.577	S1-C1
44	1.29	S1-C2	1.281	S1-C2	1.167	S1-C2
45	1.543	S1-C1	1.164	S1-C1	1.262	S1-C1
46	0.787	S1-C1	-0.212	S1-C1	0.402	S1-C1
47	0.808	S1-C1	0.094	S1-C1	0.5	S1-C1
48	1.084	S1-C2	1.089	S1-C2	0.972	S1-C2
49	4.157	S1-C2	6.035	S1-C2	4.342	S1-C2
50	3.488	S1-C2	4.044	S1-C2	3.31	S1-C2
51	3.775	S1-C2	4.863	S1-C2	3.753	S1-C2
52	2.858	S1-C2	2.418	S1-C2	2.428	S1-C2
53	2.78	S1-C2	1.987	S1-C2	2.225	S1-C2
54	3.504	S1-C2	3.317	S1-C2	3.215	S1-C2
55	2.98	S1-C2	2.639	S1-C2	2.624	S1-C2
56	2.791	S1-C2	2.194	S1-C2	2.279	S1-C2
57	2.558	S1-C2	1.984	S1-C2	2.129	S1-C2
58	4.411	S1-C3	7.318	S2-C3	4.8	S1-C3
59	5.314	S1-C3	7.925	S2-C3	5.635	S1-C3

Cuadro 31. Número de muestras de acuerdo a la clasificación de las relaciones de adsorción de sodio y conductividad eléctrica, de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Clasificación	Número de muestras RAS	Número de muestras RAS aj	Número de muestras RAS°
S1-C1	19	19	19
S1-C2	26	26	26
S1-C3	11	7	11
S1-C4	1	0	0
S2-C3	0	5	0
S2-C4	0	0	1
S3-C4	0	1	0
S4-C3	1	0	1
S4-C4	1	1	1
Total	59	59	59

Cuadro 32. Valores y clasificación de acuerdo a la sodicidad y conductividad eléctrica de las aguas con conductividades eléctricas elevadas, de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

Muestra	RAS	Tipo	RASaj	Tipo	RAS °	Tipo
1	92.544	S4-C4	32.706	S4-C4	79.025	S4-C4
2	20.503	S4-C4	42.014	S4-C4	20.681	S4-C4
3	264.513	S4-C4	313.041	S4-C4	245.992	S4-C4
4	20.985	S4-C4	45.161	S4-C4	21.192	S4-C4
5	15.971	S4-C4	50.999	S4-C4	17.990	S4-C4
6	11.240	S3-C4	31.411	S4-C4	14.007	S4-C4
7	42.279	S4-C4	115.800	S4-C4	43.556	S4-C4

Cuadro 33. Número de muestras de acuerdo a la clasificación de las relaciones de adsorción de sodio y conductividad eléctrica, de las aguas con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

Clasificación	Número de muestras RAS	Número de muestras RAS aj	Número de muestras RAS°
S3-C4	6	0	0
S4-C4	1	7	7
Total	7	7	7

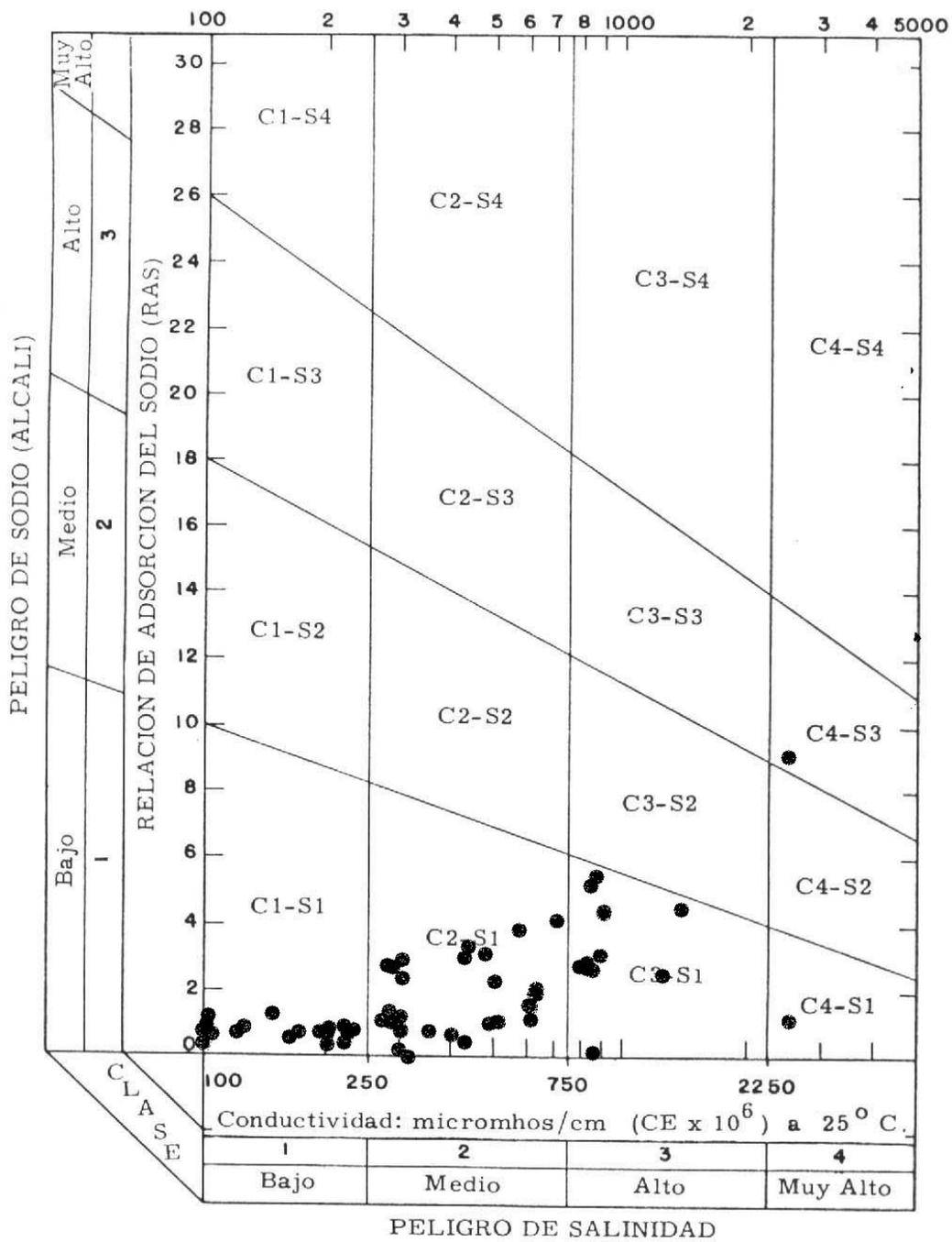


Figura 23. Diagrama de clasificación RAS y CE, de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

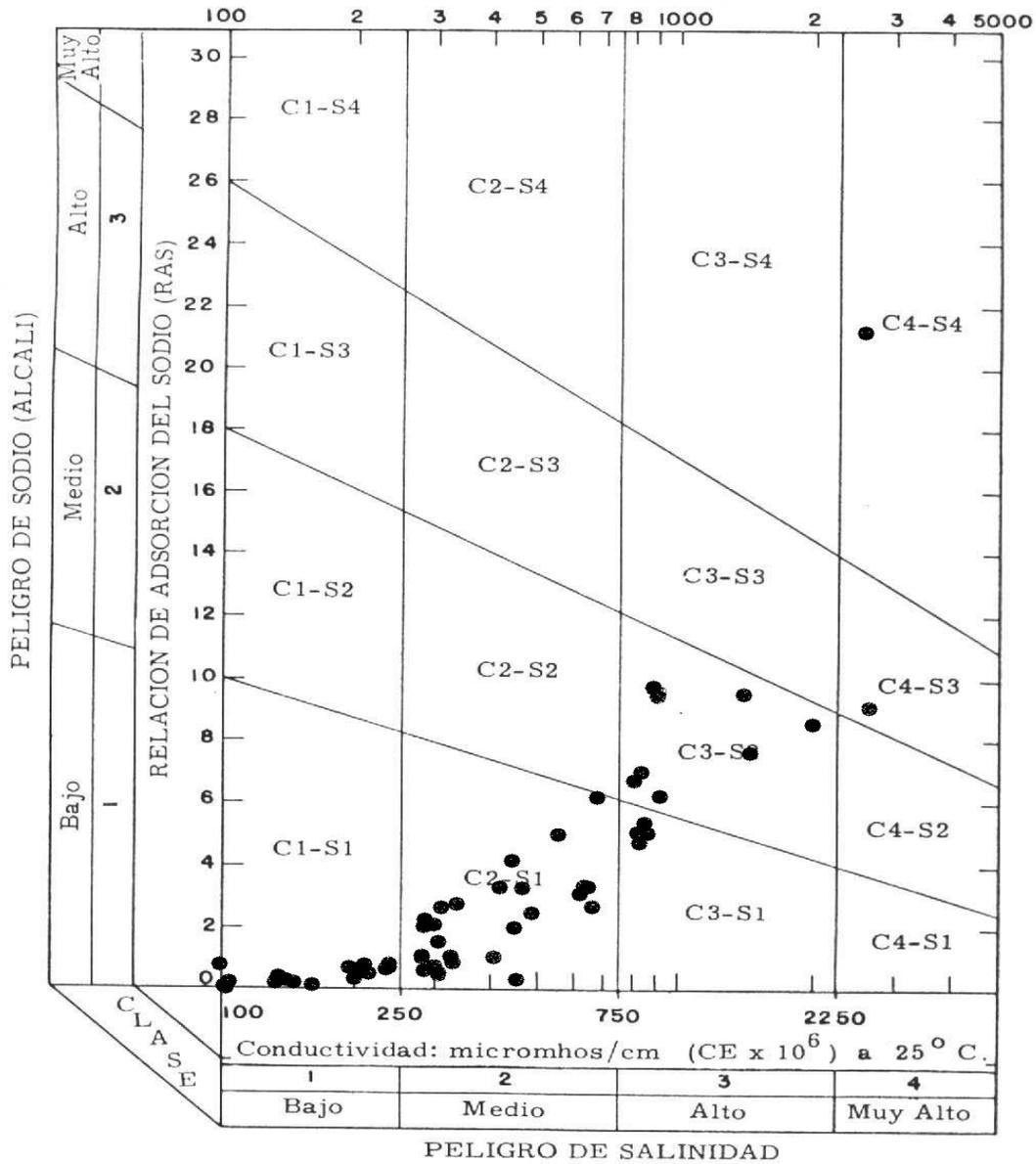


Figura 24. Diagrama de la clasificación RASaj y CE de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

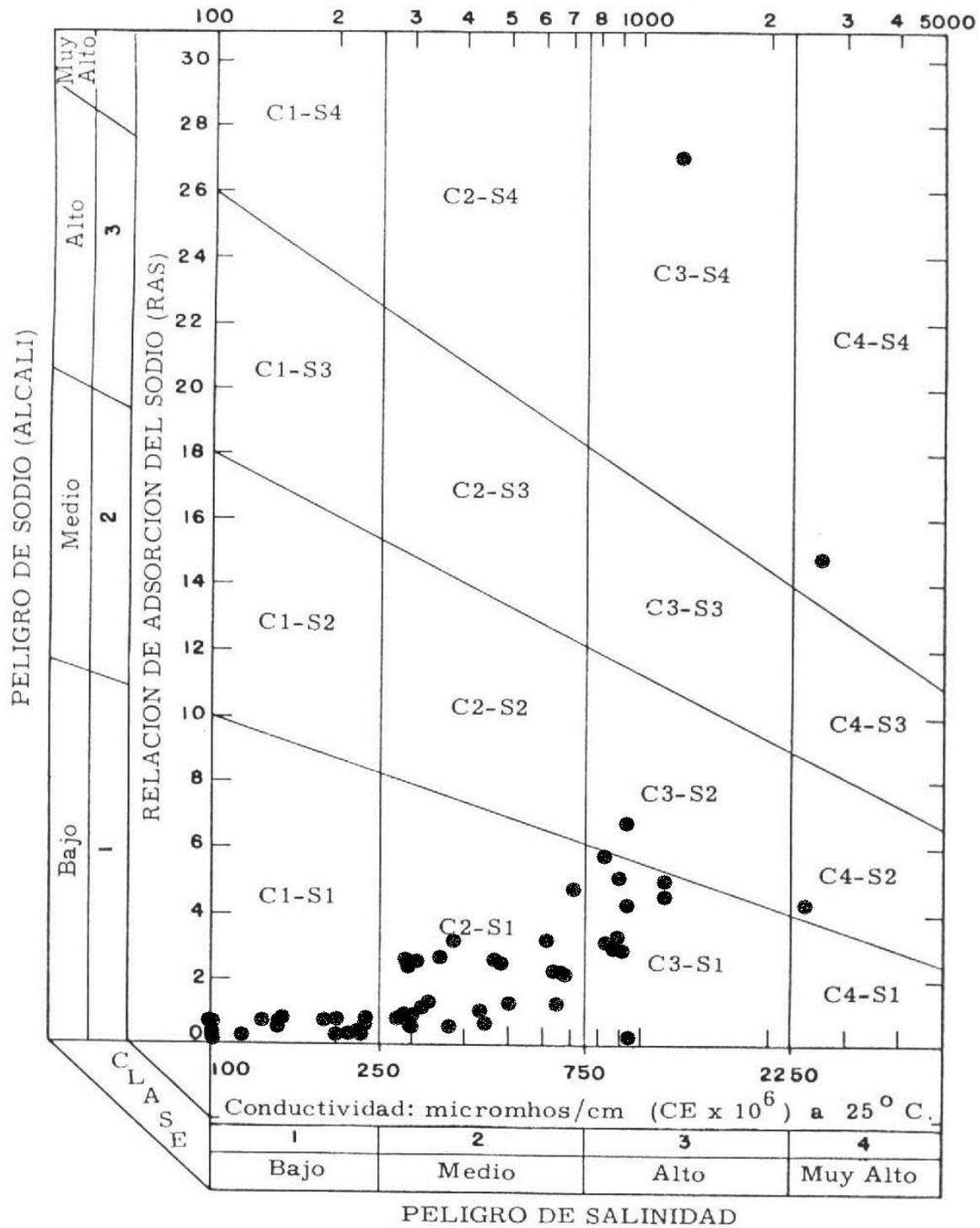


Figura 25. Diagrama de clasificación RAS° y CE, de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

6.12. PELIGROS DE INFILTRACIÓN DEL AGUA

Si, los valores de RAS no toman en cuenta las condiciones de alcalinidad y precipitación de los iones de Ca^{2+} y de Mg^{2+} , las aguas presentan ligeros problemas de infiltración; sin embargo, cuando se consideran las posibles precipitaciones de los iones de Ca^{2+} y de Mg^{2+} , las aguas residuales, en lo que se refiere a su capacidad de reducir la infiltración en los suelos, se disponen en el orden siguiente: sin reducción (RAS y RAS°) y reducción moderada (RAS_{aj}) (Velázquez *et al*, 2002). Las aguas de riego que tienen valores altos de la relación de adsorción de sodio, y estas riegan suelos que contienen considerables cantidades de minerales arcillosos 2:1, en estos suelos se presentan los valores más bajos de disminución de la conductividad hidráulica (McNeal y Coleman, 1966).

En el (cuadro 34) se contabilizo el número de muestras en relación a los peligros de infiltración y del agua del muestreo del bosque de niebla y de las aguas con conductividades elevadas, se observa que el muestreo (A) presenta entre 60 y 74 por ciento de la clasificación con reducción ligera. Sin embargo las muestras con conductividades elevadas (B), tienen el 100 por ciento de reducción severa, por lo que no son adecuadas para el riego. Si las conductividades eléctricas son muy bajas, la reducción puede ser severa, sin importar el RAS. En algunas zonas de Tlaxcala y Puebla, se riegan cultivos por aspersión, y es en esta condición cuando propicia el encostramiento de la superficie del suelo. Estos suelos se riegan con aguas, que presentan valores elevados de RAS y con elevadas concentraciones de iones bicarbonato.

Cuadro 34. Numero de muestras de acuerdo al peligro de infiltración de agua. Muestreo A (bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz) y muestreo B (aguas con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas).

Reducción de infiltración	RAS		RAS _{aj}		RAS [°]	
	Número de aguas (muestreo A)	Número de aguas (muestreo B)	Número de aguas (muestreo A)	Número de aguas (muestreo B)	Número de aguas (muestreo A)	Número de aguas (muestreo B)
Sin	9	0	1	0	2	0
Ligera	35	0	46	0	44	0
Severa	15	7	12	7	13	7
Total	59	7	59	7	59	7

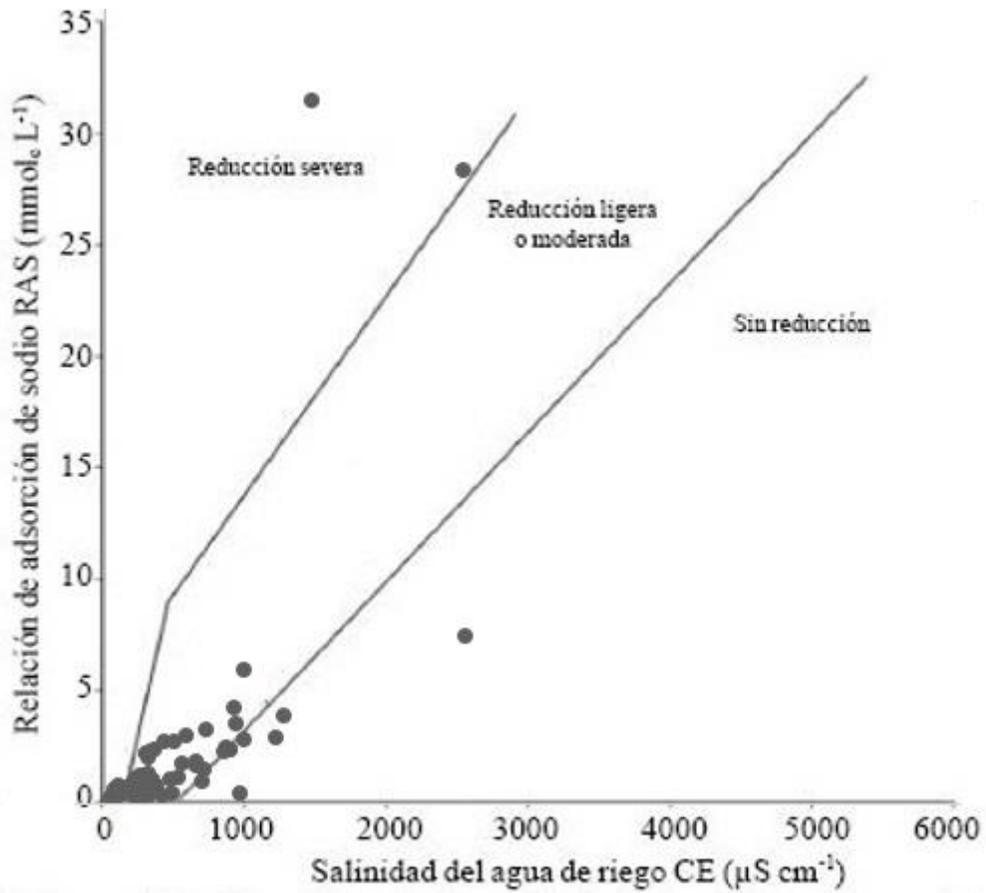


Figura 26. Reducción de la infiltración con respecto a la relación de adsorción de sodio y la conductividad eléctrica, del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

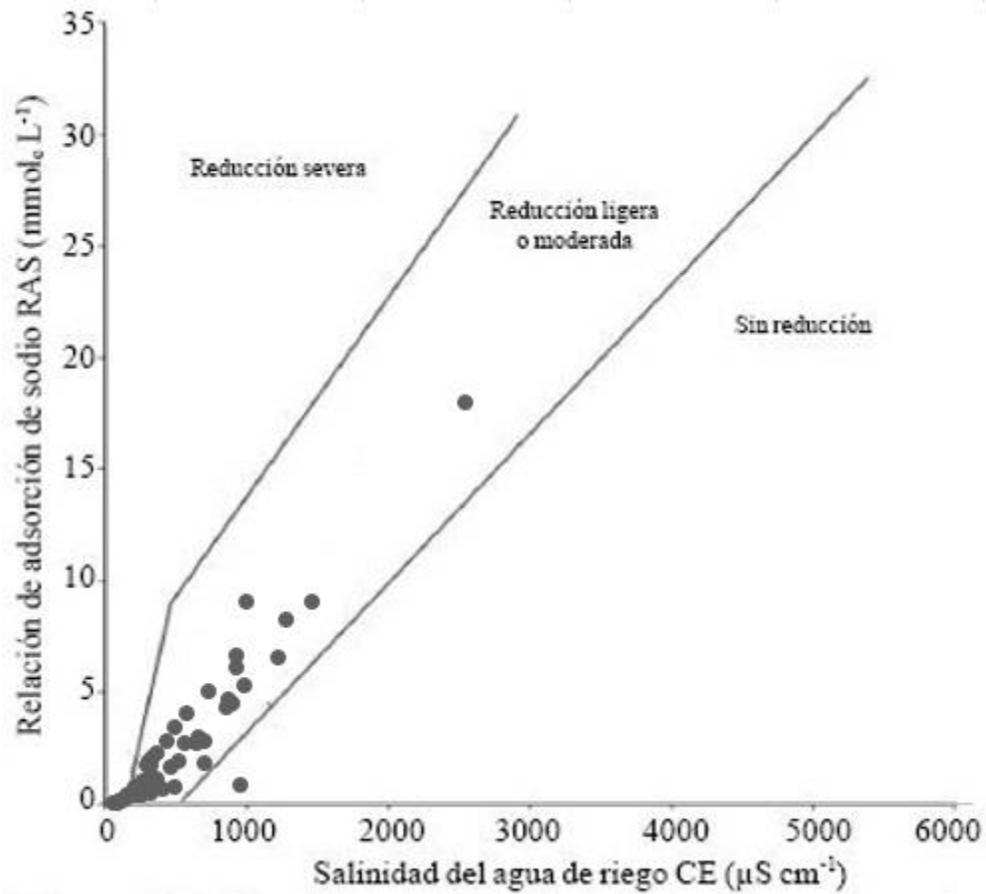


Figura 27. Reducción de la infiltración con respecto a la relación de adsorción de sodio ajustado y la conductividad eléctrica, del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

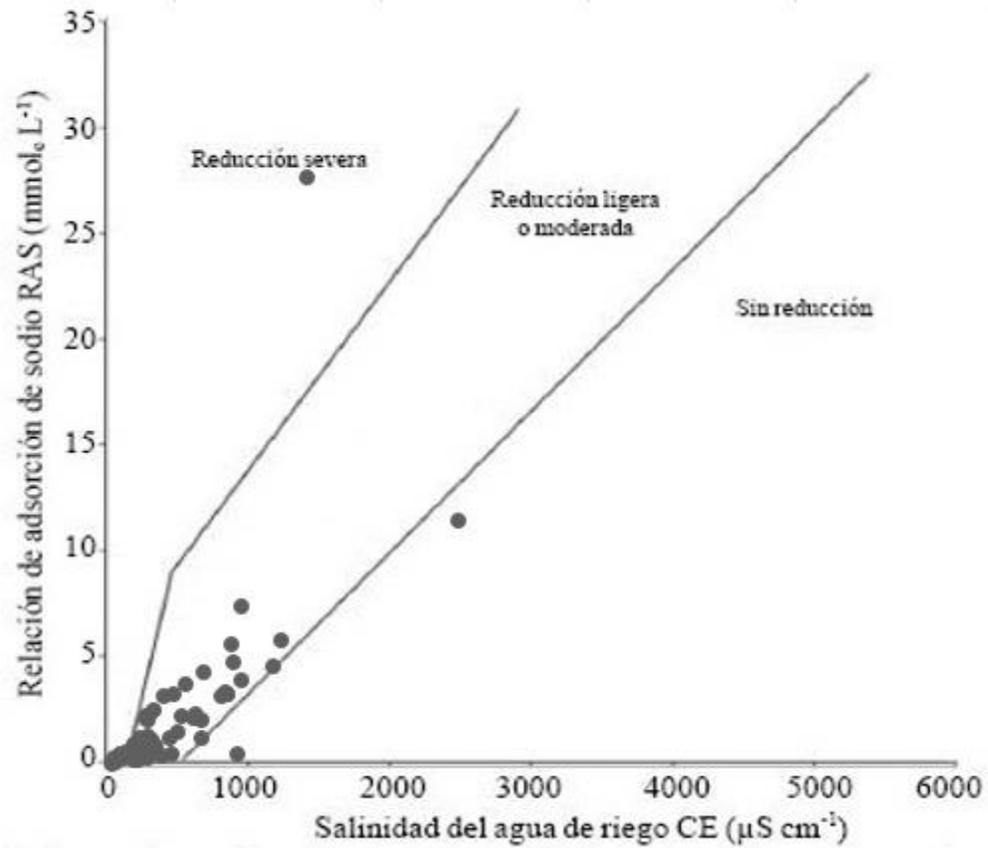


Figura 28. Reducción de la infiltración con respecto a la relación de adsorción de sodio corregido y la conductividad eléctrica, del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

6.13. EFECTO DE LOS CARBONATOS Y BICARBONATOS

En el (cuadro 35) se muestran los resultados obtenidos de las aguas del bosque de niebla y de las aguas con conductividades elevadas del PSP, PSE y CSR. Si, el contenido de carbonatos y bicarbonatos es mayor que el calcio y magnesio, existe la posibilidad de que se forme 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 magnesio. En estas condiciones el sodio puede ser suficiente para desplazar el calcio y al magnesio, produciéndose con esto la defloculación del suelo (Wilcox *et al*, 1948). Scofield (1935), dice que si los límites de PSP son superiores a 60% ya son peligrosas para los cultivos, ya que pueden ser desplazados el calcio y el magnesio, en el complejo de intercambio y se origina a partir del 50% de los cationes disueltos (Carrera, 2007). Altos contenidos de sodio intercambiable originan que estos suelos tengan propiedades físicas adversas como la disminución de la permeabilidad y dispersión de las partículas arcillosas afectando el desarrollo de los cultivos.

6.14. ÍNDICE DE SATURACIÓN

El índice de saturación (IS) es un indicador que muestra la precipitación o la solubilización del CaCO_3 . En este estudio (cuadro 34) el IS mostró que 49 muestras del bosque de niebla disolvieron y 10 precipitaron, mientras que en el muestreo de las aguas con conductividades elevadas 7 precipitaron.

Cuadro 35. Número de muestras y clasificación de las aguas, considerando el porcentaje de sodio encontrado, carbonato de sodio residual e índice de saturación. Muestreo A (bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz) y muestreo B (Aguas con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas).

Clasificación	PSE		CSR		Condición	IS	
	Muestreo A	Muestreo B	Muestreo A	Muestreo B		Muestreo A	Muestreo B
Buena	36	0	50	1	Precipita	49	7
Condicionada	7	0	5	0	Disuelve	10	0
Peligrosas	16	7	4	6			
Total	59	7	59	7		59	7

Cuadro 36. Indicadores de calidad del agua, en relación al sodio y al índice de saturación, de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Muestra	PSE	Valoración PSE	CSR	Valoración CSR	PSP	IS	Condición IS
1	13.06	Buena	-4.69	Buena	10.29	-0.16	Disuelve
2	16.55	Buena	-0.59	Buena	10.20	-0.89	Disuelve
3	18.51	Buena	-0.56	Buena	11.45	-1.06	Disuelve
4	16.71	Buena	-0.76	Buena	10.31	-0.40	Disuelve
5	16.90	Buena	-0.45	Buena	10.44	-1.41	Disuelve
6	29.56	Buena	-0.80	Buena	18.77	0.31	Precipita
7	98.34	Peligrosa	7.38	No Recomendable	74.02	-0.02	Disuelve
8	31.19	Buena	-0.16	Buena	19.03	-0.51	Disuelve
9	36.98	Buena	-0.14	Buena	23.17	-0.35	Disuelve
10	41.81	Buena	0.08	Buena	26.22	0.19	Precipita
11	62.33	Peligrosa	2.41	Marginal	39.37	0.22	Precipita
12	79.58	Peligrosa	3.09	No Recomendable	70.18	0.77	Precipita
13	53.63	Condicionada	1.13	Buena	34.27	-0.49	Disuelve
14	96.56	Peligrosa	12.4	No Recomendable	70.09	0.66	Precipita
15	48.80	Buena	0.45	Buena	30.71	-0.70	Disuelve
16	18.72	Buena	-0.39	Buena	11.67	-1.34	Disuelve
17	18.30	Buena	-0.48	Buena	11.42	-1.36	Disuelve
18	17.35	Buena	-0.43	Buena	10.79	-0.65	Disuelve
19	44.82	Buena	-0.01	Buena	28.92	-0.64	Disuelve
20	48.60	Buena	0.15	Buena	31.03	-1.48	Disuelve
21	49.30	Buena	0.13	Buena	32.16	-1.04	Disuelve
22	51.61	Condicionada	0.09	Buena	32.65	-1.32	Disuelve
23	58.33	Condicionada	1.67	Marginal	35.84	-0.34	Disuelve
24	50.90	Buena	0.33	Buena	33.26	-0.78	Disuelve
25	51.77	Condicionada	0.39	Buena	33.84	0.28	Precipita
26	51.79	Condicionada	0.31	Buena	34.03	0.34	Precipita
27	72.07	Peligrosa	6.90	No Recomendable	45.80	0.23	Precipita
28	17.40	Buena	-0.89	Buena	10.75	-0.75	Disuelve
29	53.78	Condicionada	1.48	Marginal	36.02	0.69	Precipita
30	40.74	Buena	0.02	Buena	25.35	-1.60	Disuelve
31	32.00	Buena	-0.18	Buena	20.00	-0.66	Disuelve
32	31.25	Buena	-0.08	Buena	20.00	-2.01	Disuelve
33	31.09	Buena	-0.13	Buena	19.68	-2.04	Disuelve
34	33.97	Buena	-0.07	Buena	21.03	-1.74	Disuelve
35	31.25	Buena	-0.08	Buena	19.69	-1.74	Disuelve
36	38.7	Buena	-0.15	Buena	24.48	0.07	Precipita
37	35.14	Buena	-0.02	Buena	22.03	-2.02	Disuelve
38	34.12	Buena	-0.16	Buena	21.38	-0.51	Disuelve
39	31.3	Buena	-0.28	Buena	19.81	-1.01	Disuelve
40	34.41	Buena	-0.15	Buena	21.84	-1.65	Disuelve

Cuadro 36...

Muestra	PSE	Valoración PSE	CSR	Valoración CSR	PSP	IS	Condición IS
41	32.21	Buena	-0.08	Buena	19.84	-2.08	Disuelve
42	48.65	Buena	0.09	Buena	31.14	-1.96	Disuelve
43	40.16	Buena	-0.04	Buena	25.63	-1.45	Disuelve
44	40.74	Buena	-0.1	Buena	26.13	-0.71	Disuelve
45	50.66	Condicionada	0.1	Buena	32.96	-1.25	Disuelve
46	50	Buena	0.04	Buena	31.96	-1.87	Disuelve
47	43.75	Buena	0	Buena	28.00	-1.18	Disuelve
48	37.94	Buena	-0.07	Buena	23.82	-0.80	Disuelve
49	66.67	Peligrosa	1.26	Buena	43.64	-0.45	Disuelve
50	67.19	Peligrosa	0.93	Buena	43.68	-0.74	Disuelve
51	67.18	Peligrosa	1.09	Buena	43.66	-0.51	Disuelve
52	67.35	Peligrosa	0.61	Buena	43.90	-1.25	Disuelve
53	68.46	Peligrosa	0.58	Buena	44.50	-1.19	Disuelve
54	69.61	Peligrosa	0.89	Buena	45.35	-0.95	Disuelve
55	67.08	Peligrosa	0.74	Buena	43.08	-1.12	Disuelve
56	68.03	Peligrosa	0.66	Buena	43.47	-1.51	Disuelve
57	64.52	Peligrosa	0.5	Buena	42.06	-1.13	Disuelve
58	64.22	Peligrosa	1.52	Marginal	41.76	-0.14	Disuelve
59	70.64	Peligrosa	1.96	Marginal	46.18	-0.21	Disuelve

Cuadro 37. Indicadores de calidad del agua, en relación al sodio y al índice de saturación, de las aguas con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

Muestra	PSE	Valoración PSE	CSR	Valoración CSR	PSP	IS	Condición IS
1	98.74	Peligrosa	27.46	No Recomendable	78.61	0.65	Precipita
2	71.37	Peligrosa	9.28	No Recomendable	65.50	1.25	Precipita
3	99.4	Peligrosa	78.85	No Recomendable	89.75	1.38	Precipita
4	70.76	Peligrosa	6.5	No Recomendable	66.70	1.65	Precipita
5	64.82	Peligrosa	19.48	No Recomendable	42.25	1.39	Precipita
6	67.7	Peligrosa	9.4	No Recomendable	44.13	1.10	Precipita
7	70.2	Peligrosa	-130	Buena	66.41	1.20	Precipita

6.15. HIDROQUÍMICA

El diagrama triangular de (Piper, 1944) es ideal para representar seis componentes: Ca^{+2} , Mg^{+2} y $(\text{Na}^{+}+\text{K}^{+})$, $(\text{CO}_3^{-2} + \text{HCO}_3^{-})$, Cl^{-} y SO_4^{-2} . Cuando se llevan a cabo las graficaciones de acuerdo con Piper (1944), se puede analizar claramente las clasificaciones y es una de sus mayores ventajas.

Los principales iones son: Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} , K^{+} , CO_3^{-2} , HCO_3^{-} , Cl^{-} y SO_4^{-2} . Los iones que se encuentran en forma conjunta, en las soluciones acuosas son: CO_3^{-2} y HCO_3^{-} se le conoce como el sistema carbonato: $\text{HCO}_3^{-} \rightleftharpoons \text{CO}_3^{-2} + \text{H}^{+}$. El paso de $\text{HCO}_3^{-} \rightleftharpoons \text{CO}_3^{-2}$, se presenta como consecuencia de pequeños cambios en la temperatura del medio ambiente.

En las (figuras 29 y 30) y los (cuadros 38 y 39), se observa que la mayoría de las muestras del bosque de niebla son bicarbonatadas-sódicas (49.15%), mientras que en el caso de las aguas con conductividades elevadas son cloruradas-sódicas (57.14%).

Las diferentes relaciones iónicas de estas aguas, se encuentran en cierto equilibrio químico, dentro del espesor de los suelos, y es por esta razón que pueden desarrollar, procesos específicos de quimismo, en los suelos donde son regados (López, 2011).

Cuadro 38. Clasificación, número y porcentaje de la hidroquímica de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Clasificación	Número de muestras	%
Bicarbonatada-Cálcica	11	18.64
Bicarbonatada-Magnésica	19	32.75
Bicarbonatada-Sódica	29	49.15
Total	59	100

Cuadro 39. Clasificación, número y porcentaje de la hidroquímica de las aguas con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

Clasificación	Número de muestras	%
Clorurada-Sódica	4	57.14
Clorurada-Sulfatada	1	14.28
Bicarbonatada-Sódica	2	28.57
Total	7	100

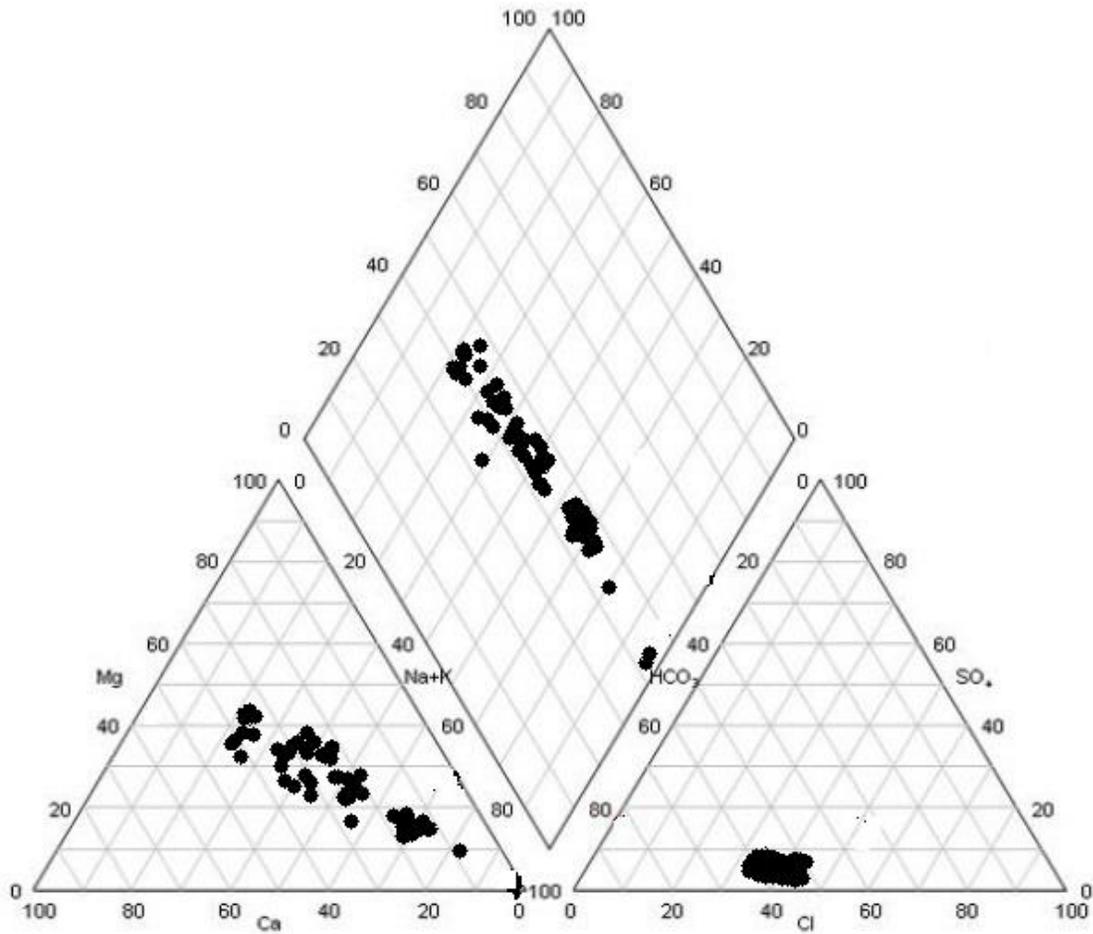


Figura 29. Diagrama de Piper. Composición hidroquímica de las muestras de agua del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

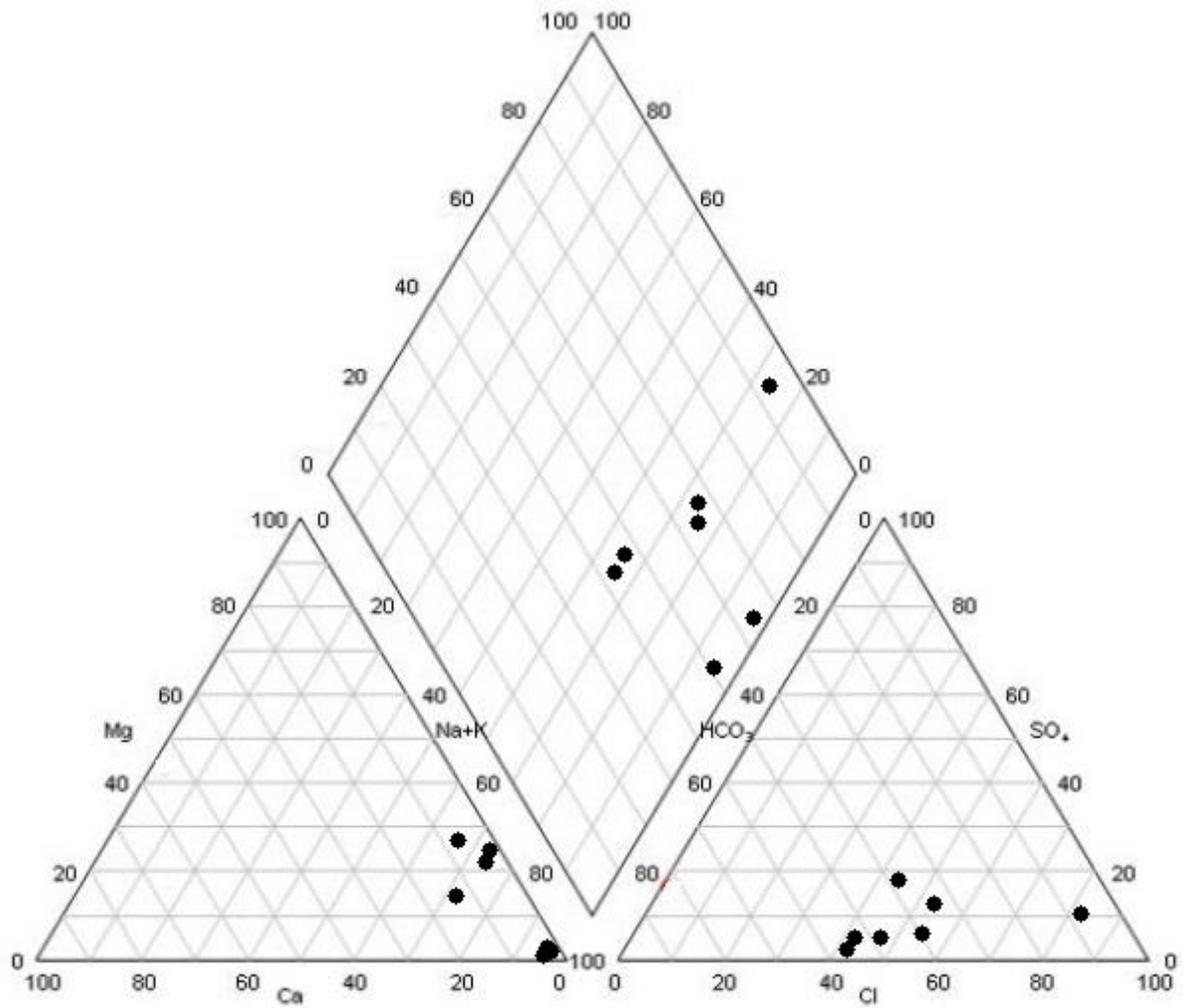


Figura 30. Diagrama de Piper. Composición hidroquímica de las muestras de agua con conductividades eléctricas elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

6.16. TOXICIDAD DE IONES ESPECIFICOS

6.16.1. BORO

El boro tiene una influencia directa en la actividad de componentes específicos de la membrana celular y por lo tanto es esencial para la estabilidad de la misma. Es absorbido por las plantas principalmente en forma de ácido bórico (H_3BO_3), no disociado por flujo de masas y difusión, aunque en algunas extensiones se absorbe en forma de anión borato $B(OH)^-$, y es poco movable en la planta (Alarcón, 2001).

El boro en concentraciones menores de 1.0 mg L^{-1} es esencial para el desarrollo de las plantas, pero en altas concentraciones este ion puede provocar problemas en cultivos sensibles. La mayoría de las plantas pueden tener problemas de toxicidad cuando la concentración de boro aumenta más de 2.0 mg L^{-1} . Se considera que la máxima concentración tolerable es de 4.0 mg L^{-1} . (Valdez, 2015).

En la (figura 31), se conserva la distribución y en el (cuadro 39) las concentraciones de boro del bosque de niebla ($1-2 \text{ mg L}^{-1}$) clasificadas como condicionadas (52 muestras) y de ($2-4 \text{ mg L}^{-1}$) clasificadas como no recomendables (5 muestras), para las aguas con conductividades elevadas (figura 32) y (cuadro 40). La muestra de los Humeros, Puebla del bosque de niebla, presenta elevada concentración de boro (450 mg L^{-1}).

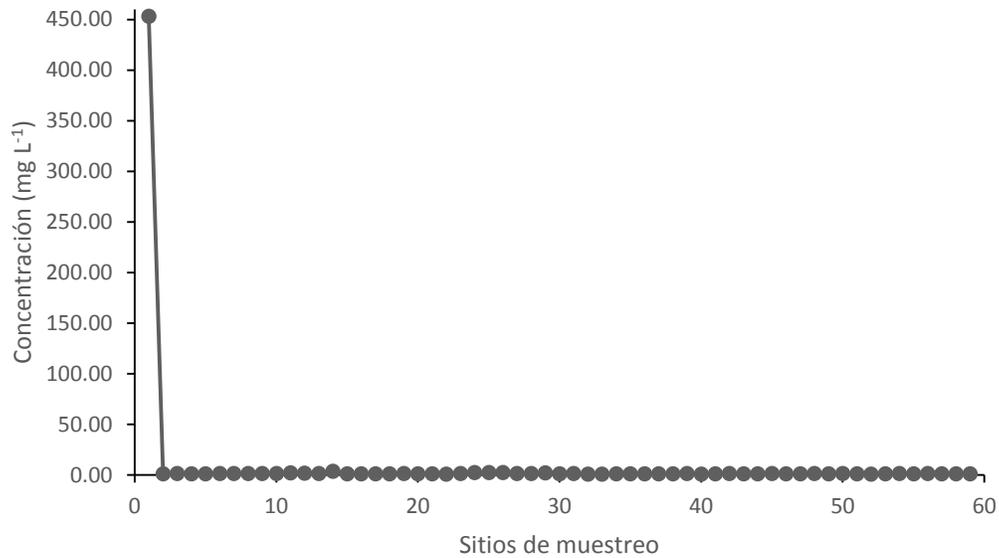


Figura 31. Concentraciones del ion boro, de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Cuadro 40. Clasificación y número de muestras de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz, en base al ion boro.

Concentración de Boro mg L⁻¹	Clasificación	Número de muestras	%
0.3-1.0	Buena	0	0
1.0-2.0	Condicionada	52	88.13
2.0-4.0	No recomendable	7	11.86
Total		59	100

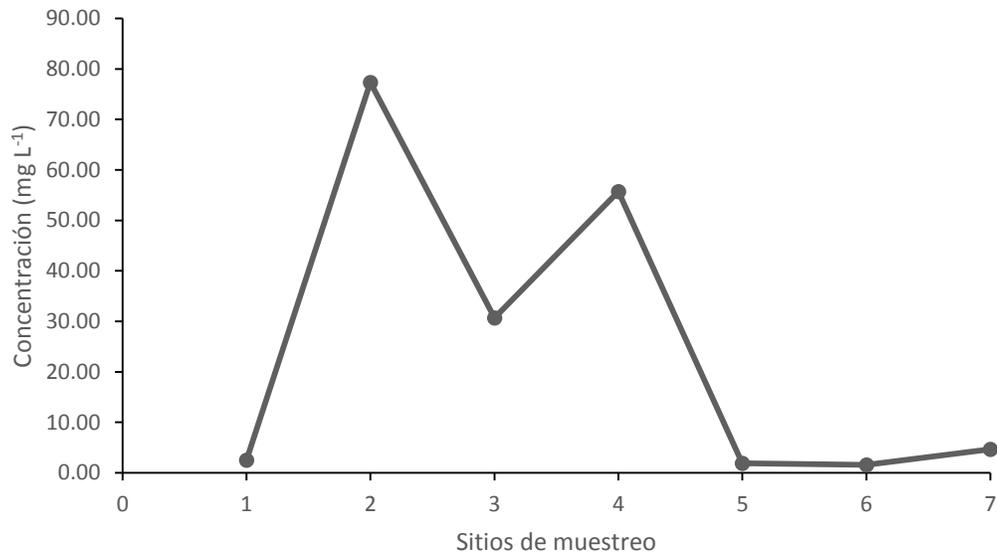


Figura 32. Concentraciones del ion boro, de las aguas con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

Cuadro 41. Clasificación y número de muestras de las aguas con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas, en base al ion boro.

Concentración de Boro mg L-1	Clasificación	Número de muestras	%
0.3-1.0	Buena	0	0
1.0-2.0	Condicionada	2	28.57
2.0-4.0	No recomendable	5	74.42
Total		7	100

6.16.2. NITRATOS

Los nitratos son compuestos solubles que contienen nitrógeno y oxígeno. El nitrito (NO_2^-) generalmente se convierte a nitrato (NO_3^-), lo que significa que el nitrito esta, raramente en aguas subterráneas. El nitrato es esencial en el crecimiento de las plantas y está presente en todos los vegetales y granos. Por ésta razón, el uso predominante del nitrato en la industria es como fertilizante. Los niveles naturales de nitrato varían de cero a cerca de 5 mg L^{-1} . Si el valor es más de 5 es posible que el nitrato, se está introduciendo en el agua subterránea, desde la superficie o desde un sistema séptico (Singler y Bauder, 2011).

Si la concentración de nitratos fluctúa dentro del rango de 5 a 30 mg L^{-1} , el uso de esta agua presenta una restricción moderada. En cambio si las aguas de riego tienen una concentración de nitratos $> 30 \text{ mg L}^{-1}$, estas aguas presentan restricciones severas en su uso.

El (86.44%) de las aguas del bosque de niebla y el (100%) de las muestras con conductividades elevadas, no presentaron ninguna condición de riesgo, lo cual las hace recomendable para el riego agrícola (cuadros 42 y 43) y (figuras 33 y 34).

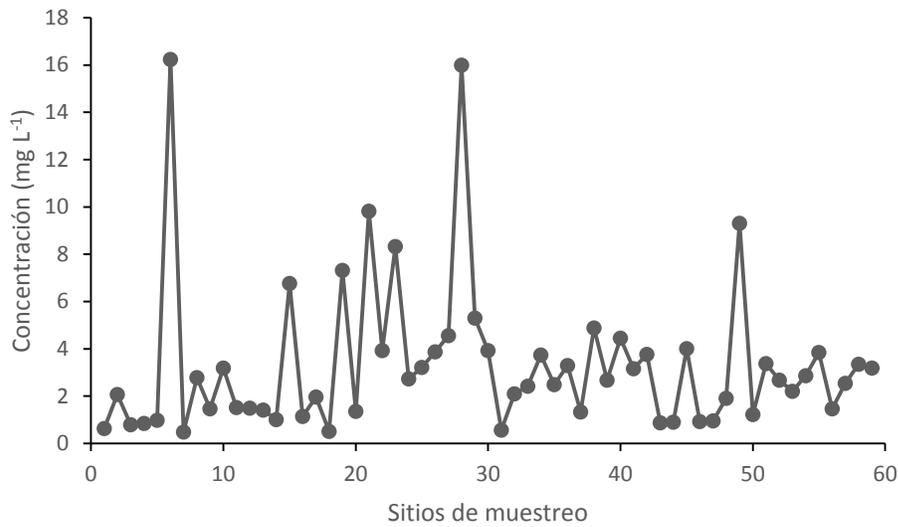


Figura 33. Concentraciones del ion nitrato, de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Cuadro 42. Cuadro. Clasificación y número de muestras de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz, en base al ion nitrato.

Concentración de Boro mg L⁻¹	Condición	Número de muestras	%
<5	Ninguno	51	86.44
5-30	Ligero	8	13.55
>30	Severo	0	0
Total		59	100

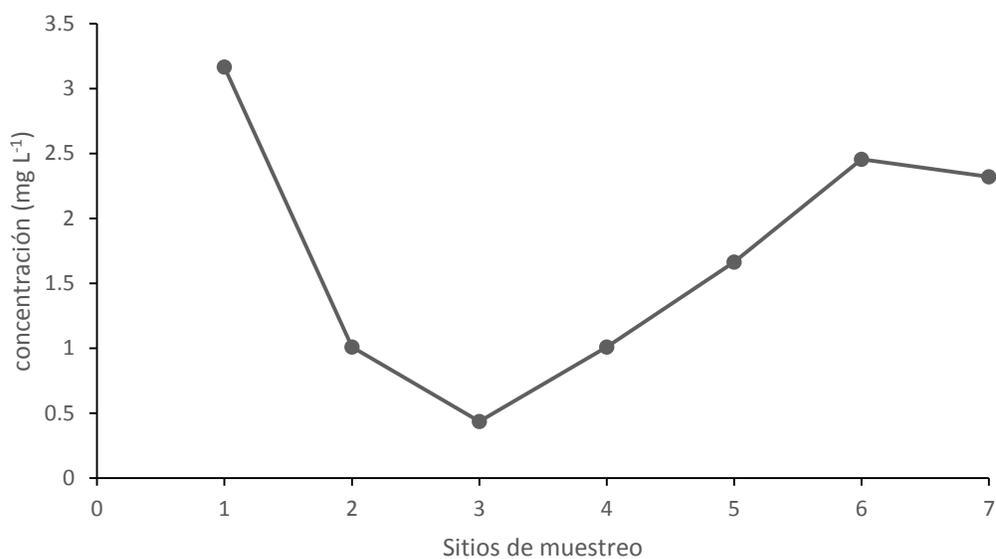


Figura 34. Concentraciones del ion nitrato, de las aguas con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

Cuadro 43. Clasificación y número de muestras de las aguas con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas, en base al ion nitrato.

Concentración de Boro mg L⁻¹	Condición	Número de muestras	%
<5	Ninguno	7	100
5--30	Ligero	0	0
>30	Severo	0	0
Total		7	100

6.16.3. FOSFATOS

El fósforo se determinó en su forma de ortofosfato, se clasificó de acuerdo a la concentración normal de fósforo en aguas de riego propuesta por (Ayers y Westcot, 1987), la cual debe estar entre 0 y 2 mg L⁻¹. El fósforo es un elemento esencial en el crecimiento de las plantas (Daniel *et al*, 1998), pero se encuentra en concentraciones pequeñas, por su tendencia a formar iones complejos y compuestos de baja solubilidad con un extenso número de metales y por ser adsorbido por sedimentos hidrolizados (Fetter, 1999).

Los datos del muestreo del bosque de niebla, indican que en el total de las aguas, se encuentran en la condición normal (cuadro 44) y (figura 35), lo mismo sucede, en las muestras con conductividades elevadas (cuadro 45) y (figura 36). Por lo que, no hay peligro de acelerar la eutrofización (cuadro). El exceso de fósforo acelera la maduración de los vegetales (Seoáñez, 2005), por ello es importante que aguas con concentraciones altas de fósforo no se utilicen para riego.

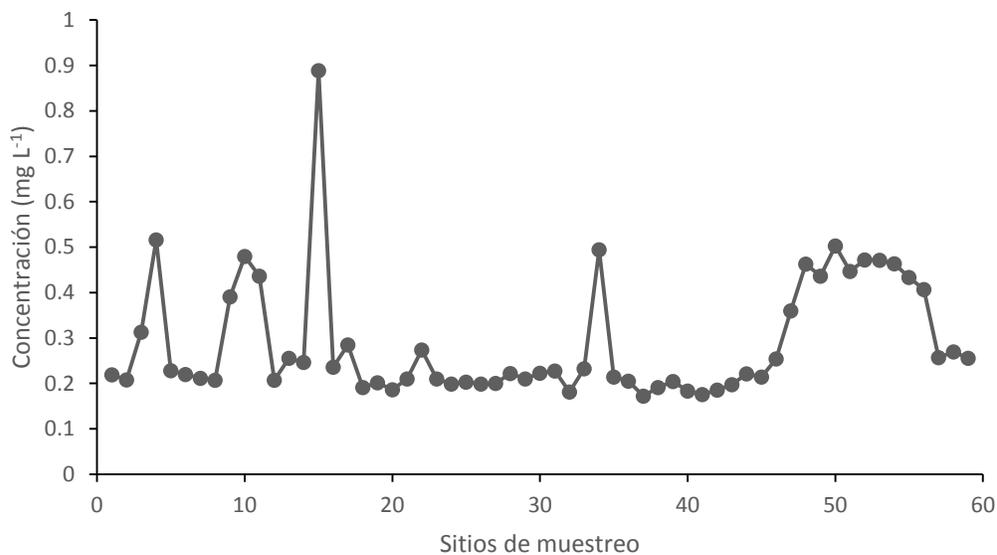


Figura 35. Concentraciones del ion fosfato, de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Cuadro 44. Clasificación y número de muestras de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz, en base al ion fosfato.

Concentración de Ortofosfatos mg L⁻¹	Valoración	Número de muestras	%
0.0-2.0	Normal	59	100
Total		59	100

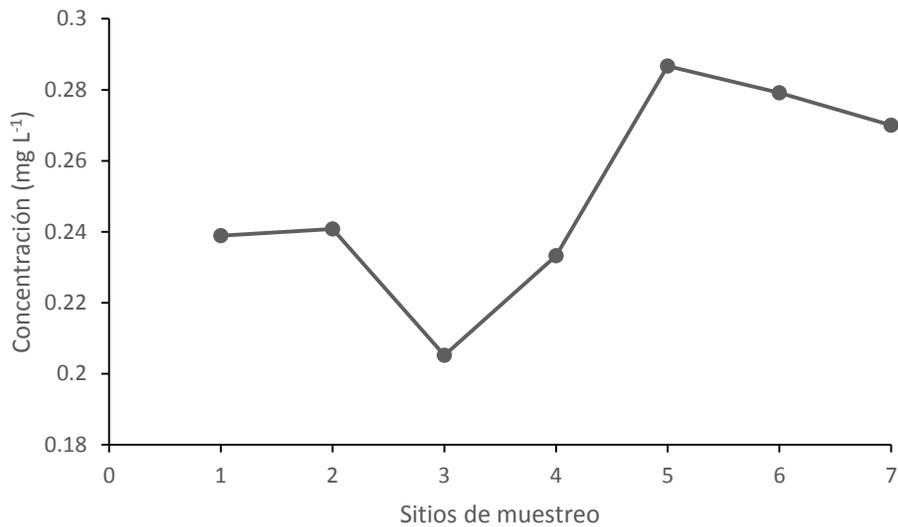


Figura 36. Concentraciones del ion fosfato, de las aguas con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

Cuadro 45. Clasificación y número de muestras de las aguas con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas en base al ion fosfato.

Concentración de ortofosfatos mg L⁻¹	Valoración	Número de muestras	%
0.0-2.0	Normal	7	100
Total		7	100

6.16.4. SILICIO

El silicio es el componente principal de las rocas de origen volcánico, sedimentarias y calizas, por esa razón el agua contiene silicio. La solubilidad del silicio se incrementa con la temperatura, en las (figuras 37 y 38) se muestran las distribuciones de las concentraciones. Se encontró la concentración más elevada (17.36 mg L^{-1}) que corresponde al agua de la presa Nanacamilpa, Tlaxcala. Y la concentración más alta, de las aguas con conductividades elevadas es de (16.46 mg L^{-1}) del lago cráter Atexcac, Puebla.

La concentración del silicio en aguas continentales, medida como sílice (SiO_2), oscila entre 0.2 y 60 mg L^{-1} . Estos valores podrían aumentar con el aporte de sílice y silicatos (SiO_4 y SiO_3^{-2}), provenientes de descargas industriales y domésticas.

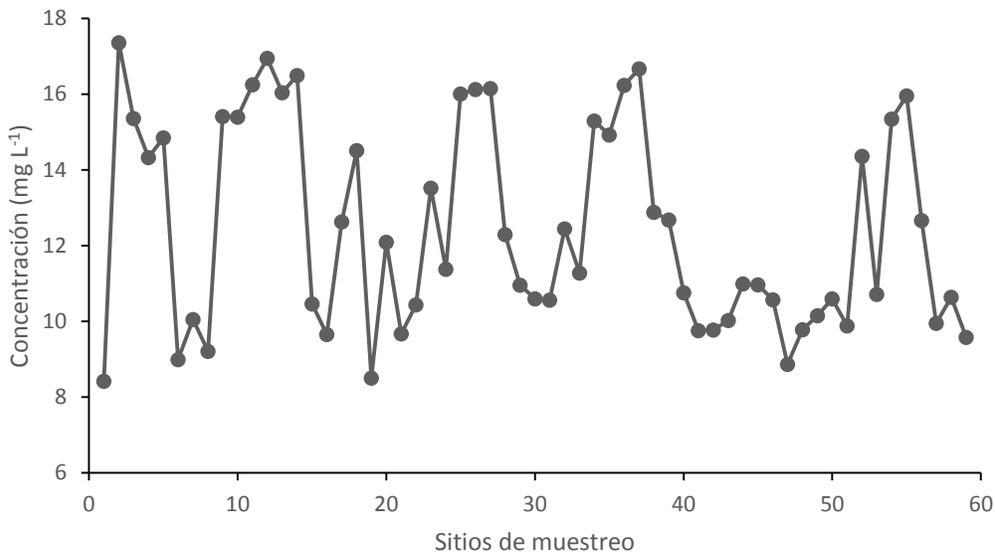


Figura 37. Concentraciones del ion silicio, de las aguas del bosque de niebla de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

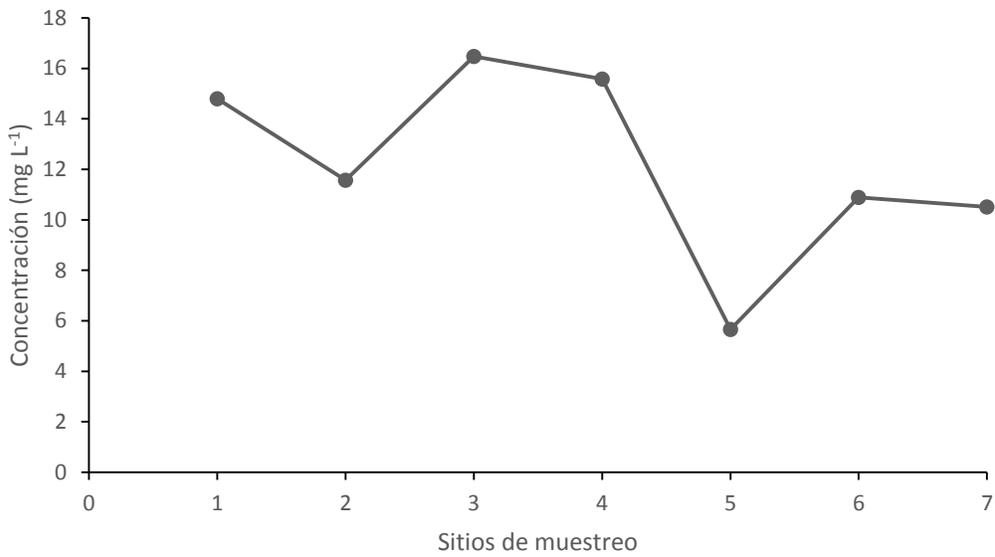


Figura 38. Concentraciones del ion silicio, de las aguas con conductividades elevadas de Puebla, Veracruz y Tamaulipas.

7. CONCLUSIONES

El sodio (Na^+) es el catión más dominante en las muestras del bosque de niebla y de las aguas con conductividades elevadas.

El bicarbonato (HCO_3^-) es el anión más dominante en las muestras del bosque de niebla y de las aguas con conductividades elevadas.

La CE de las muestras del bosque de niebla $40\text{-}346 \mu\text{S cm}^{-1}$ (50.54%) y de las aguas con conductividades elevadas $5000\text{-}17000 \mu\text{S cm}^{-1}$ (72.00%).

Salinidad efectiva de las muestras del bosque de niebla es buena (67.79%) y de las aguas con conductividades elevadas es no recomendable (100%).

Salinidad potencial de las muestras del bosque de niebla es buena (76.27) y de las aguas con conductividades elevadas es no recomendable (100%).

La clasificación S1, de las muestras del bosque de niebla es: RAS (96.61%), RASaj (93.22%) y RAS° (94.91%). Mientras que el (100%) de las aguas con conductividades elevadas en las tres relaciones de adsorción de sodio es S4.

Existe peligro de infiltración ligera en la mayoría de las muestras del bosque de niebla. Y peligro severo en todas las muestras con conductividades elevadas.

El índice de saturación indica que (83.05%) de las muestras del bosque de niebla si disuelven. Y la totalidad de las muestras con conductividades elevadas precipitan.

La clasificación hidroquímica muestra que el (18.64%) de las aguas del bosque de niebla son bicarbonatadas-cálcicas y bicarbonatadas-magnésicas (32.75%). En el caso de las muestras con conductividades elevadas son cloruradas-sódicas (57.14%) y bicarbonatadas-sódicas (28.57%).

El boro, de las aguas del bosque de niebla, está condicionado para el riego (88.13%) y para las muestras con conductividades elevadas, no es recomendable el riego (74.42%).

El ion nitrato y fosfato, no tiene ninguna restricción para el riego, en ambos muestreos.

8. RECOMENDACIONES

Para evitar problemas de compactación o de adsorción de sodio en pequeñas cantidades, se requiere labranza profunda seguida de rastreo bianual.

Tomar en cuenta las tres relaciones de adsorción de sodio.

Incorporación de yeso (CaSO_4)- $2\text{H}_2\text{O}$ en suelos sódicos degradados o en agua directamente.

Hacer estudios de calidad de agua, antes regar los cultivos agrícolas.

9. LITERATURA CITADA

- Alarcón V. A. L. (2001). El boro como nutriente esencial. ETSIA. UPC. Cartagena, Colombia.
- Alcocer, D.J.; Escolero, F.Ó.A. y Marín, S.L.E. (2005). Problemática del agua de la cuenca Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala. En: B. Jiménez y L. Marín (eds.). El agua en México vista desde la academia. Academia Mexicana de Ciencias. México, D.F., pp. 57-77.
- Alvarado, Z. A. (2014). Conoce la biodiversidad de México. Revista UNAM. Sala de Biodiversidad. UNIVERSUM-UNAM. Vol.1. Núm. 2.
- Amrhein, C. and D. L. Suarez. (1991). Sodium-calcium exchange with anion exclusion and weathering corrections. Soil Sci. Soc. Am. J. 55:698-706.
- APHA. (1989). Estandar methods for examination of water and wastewater. 20 ed. American Public Health Association, American Water Works Association. Water Pollution Control Federation. Washington, D. C. U.S.A. 1325 pag.
- Arredondo, F.J., Borrego L. R. y Valladolid M. (1983). Batimetría y morfometría de los lagos maars de la cuenca de Oriental, Puebla, México. Biótica: 8(1)31-47.
- Ayers R.S y Westcot, D. W. (1987). La calidad del agua y su uso en la agricultura. Estudio FAO Riego y drenaje 29 Rev. Roma, Italia.174 pg.
- Bascones, M. E. (2014). Análisis de suelo y consejos de abonado. INEA. Dirección de Calidad del Laboratorio de Análisis Agrícola. (Publicación realizada con la Excma. Diputación Provincial de Valladolid, España).
- Basurto, S. M, Núñez, B. A., Pérez, L. R. y Hernández, R. A. (2008). Fisiología del estrés ambiental en plantas. Aventuras de pensamiento. Ed. Facultad de Ciencias Agrotecnológicas. Universidad Autónoma de Chihuahua, México. 45:1-5.
- Bingham, F. T. (1982). Methods of soil analysis, part 2. Chemical and microbiological properties, agronomy monograph No. 9. (2nd Ed) pp. 431-447.
- 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.
- Can, C. A. (2011). Calidad de las aguas para riego en la cuenca del oriental y sierra norte, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados, campus Montecillo.
- Carrera, V. D. (2007). Calidad de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. Tesis de maestría en ciencias. Montecillo, Texcoco, Estado de México

- Castro, E. I., Pacheco, M. A. y Coronado, P. V. (2009). Origen de los sulfatos en el agua subterránea del sur de la sierrita de Ticul, Yucatán. V.3. Ingeniería 13-1-49-58
- Cerón, J. C., Vallejo, M. M. y García, L. R. (2000). CO₂-rich thermomineral groundwater in the Betic Cordilleras, southeastern Spain: Genesis and tectonic implications. *Journal Hydrology*. 8: 209-217.
- Choudhary, O. P., Ghuman, B. S., Josan, A. S. y Bajwa, M. S. (2006). Effect of alternating irrigation with sodic and non-sodic waters on soil properties and sunflower yield. *Agricultural Water Management*. 85: 151-156.
- CONABIO. (2012). Dos décadas de historia. México. D.F.
- CONAGUA. (2011). Estadísticas del agua en México, edición 2011. Capítulo 8 Agua en el mundo.
- Coras, M, P. (1996). Calidad química del agua para riego. Universidad Autónoma Chapingo, México: UACH. Departamento de Fitotecnia.
- Custodio E. y Llamas R. (1996). Hidrología Subterránea. 2 tomos. Ed. Omega S.A., Barcelona España. p. 2350.
- Daniel, T. C., Sharpley, N. y Lemunyon, J. L. (1998). Agricultural phosphorus and eutrophication: a symposium overview. *Journal Environmental Quality*. 27: 251-257.
- Díaz, P. y Bonilla, N. (2005). Calidad del agua de la presa Manuel Ávila Camacho utilizada para el riego de los cultivos en el distrito de riego 030 de Valsequillo. Departamento de agroecología y ambiente. Instituto de ciencias de la BUAP.
- Doneen, L. D. (1975). Water quality for irrigated Agricultural. in: A. Poljakoff, Mayber A., and J. Gale (Eds.). *Plant in saline environments*. Springer-Verlang. New York. U.S.A.
- Duque, E. G. (2014). Manual de geología para ingenieros. Cap. 5. Los minerales. Universidad Nacional de Colombia.
- FAO. (2011). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. Cómo gestionar los sistemas en peligro. Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura. Roma.
- Fernández, C. M. (1997). Metodología para pronóstico de factibilidad de salinización de suelos por riego sobre formaciones arcillosas de origen marino. *Investigaciones hidrogeológicas en Cuba*. Bilbao: LANKOPI. pp. 243-251.
- Fetter, C. W. (1999). *Contaminant hydrogeology*. Prentice Hall. p. 500.
- Flores, J. A., Becerril, R. V., Gonzales, H., Tijerina, L. C. y Vásquez, T. R. (2005). Crecimiento vegetativo y floral del crisantemo *Dendranthema x grandiflorum* Ramat Kitamura, en respuesta a la presión osmótica de la solución nutritiva. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*. 11(2): 241-249.

- Gasca D.A. (1982). Génesis de los lagos cráter de la cuenca de Oriental. Colec. Cient. Inst. Nal. Antropol. Hist. 98 México. 45 pp.
- Greenberg, A. E. (1992). Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th
- Gutiérrez, J y García, J. (1954) Diferentes clasificaciones de la calidad de las aguas para riego. La Habana; INRH. 51 p.
- INEGI. (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Geoestadística. 21207. 2009.
- IUSS. (2007). Base referencial mundial del recurso suelo. Primera actualización. Grupo de trabajo WRB. Informes sobre recursos mundiales de suelos. No. 103. FAO, Roma. Italia.
- Jaimes, C. E. (2010). Evaluación y clasificación de agua de los pozos caña Limón y Caricare del occidente de Colombia, para su posible uso como agua de riego. Universidad de Santander. Facultad de ciencias. Bucaramanga, Colombia. Tesis.
- Kovda, V. A., C. Vanden Berg C. and R. M. Hogan. (1967). International source book on Irrigation and drainage of arid lands in relation to salinity and alkalinity. FAO/UNESCO.
- Langelier, W. F. (1936). The analytical control of anti-corrosion water treatment. J. Am. Water works Assn. 28(10):1500-1521.
- Larqué, S. A. y Trejo C. L. (1990). El agua en las plantas. Editorial Trillas. México. p. 88.
- Larque, S. F. (1980). Fisiología vegetal experimental, el agua en las plantas. 1ed. Colegio de Postgraduados. México. Pp. 63.
- López, G. A. D. (2011). Calidad agrícola de las aguas urbano-industriales del valle del mezquital, Hidalgo. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. México.
- Mancilla, V. O. R. (2012). Índices de salinidad y calidad de las aguas superficiales de Tlaxcala, Puebla y Veracruz. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados. México.
- Mass, E. (1984). Salt tolerance of plants. In the handbook of plants science in agriculture. B. R. Christie ed. CRC. Pres. Boca raton, florida. USA.
- Mata, F. I., Rodríguez, G. M.L., López B. J. y Vela, C. G. (2014). Dinámica de la salinidad en los suelos. Revista digital del departamento. El hombre y su ambiente. Vol. 1 (5): 26-35.
- McNeal, B.L., y Coleman, N. T. (1966). Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 30:308-312.
- Mendoza, S. I. (2009). Calidad de las aguas residuales urbano-industriales que riegan el valle del Mezquital, Hidalgo, México. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados. México.

- Millero, F.J. (1975). Seawater as multicomponent electrolyte solution. The sea Vol. 5Ch.1, En: E.D. Golberg (ed.), Jhon Wiley and Sons, New York. USA. pp: 3-80.
- Otero, L., Alden, F., Galvez, V. y Morales, R. (2007). Caracterización y evaluación de la salinidad. Instituto del suelo. Ministerio de agricultura. Cuba.
- Pérez, D. J. P. (2014). Composición iónica del agua de la cuenca Lerma-Santiago-pacífico. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. México.
- 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. Editorial agrícola española S.A. 2da ed. Madrid, España.
- Poulsen, D. L., Simmons, C. T., y Cox, J. W. (2006). Assessing catchment-scale spatial and temporal patterns of groundwater and stream salinity. Hydrogeology Journal. 14(7): 1339-1359.
- Preciado, R. P., Baca, C. G. A., Tirado, T. J. L., Kohashi, S. J., Tijerina, C. L. y Martínez, G. A. (2003). Presión osmótica de la solución nutritiva y la producción de plántulas de melón. Terra vol. 21. Número 4. pp. 461-470.
- Prieto, D. (2008). Riego con aguas salinas y aguas de drenaje, control de impacto de salinidad. Jornadas sobre medio ambiente y riegos: Modernización y ambientalidad. La Antigua, Guatemala. Red riegos. CYTED y AECID.
- Ramírez, B. (2007). Reportan insalubre agua del Río Apatlaco. Excélsior, Cuernavaca Morelos. Sitio Web http://www.nuevoexcelsior.com.mx/27_1949.htm
- Rhoades, J. D. (1968). Drenaje for salinity control. In: Drenaje for agricultura. Van. Schilfgaard. J. (ed). Amer. Soc. Agron. Monograph. N° 17. pp.
- Richards, L. A. (1982). Suelos Salinos y Sódicos. Personal del Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América. Manual de Agricultura No. 60. p. 172.
- Robarge, W. P., A. Edwards y B Jhonson. (1933). Water and waste water analysis for nitrate via nitration of salicylic acid. Comm. Soil Sci. Plan Anal. 14(12):1207-1215.
- Rodier J. (1978). Análisis de las aguas. Ediciones Omega. Barcelona, España. Pp:186-191.
- Rodríguez, A. A. y Escolero, F. O. (2004). Interacción lago-acuífero, caso: la laguna de Alchichica, Puebla. Geohidrología. Fac ingeniería y geología, UNAM.
- Sainz, J. S. y Becerra, M. P. (2006). Los conflictos por agua en México: avances de investigación, Instituto Nacional de Ecología, México.

- Sarabia, M. I. F., Cisneros, A. R. C., Aceves, A. J., Durán, G. H. M. y Castro, L. J. (2011). Calidad del agua de riego en suelos agrícolas y cultivos del valle de San Luis Potosí, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* Vol. 27 No.2 México.
- SCDB. (2010). *Perspectiva Mundial sobre la Diversidad Biológica 3*. Montreal. Canadá. 94 pp.
- Scofield, F.E. (1935). The salinity of irrigation water. *Smith. Instit. Ann. Rep.*, 1935:275-283.
- SEMARNAT. (2009). *El medio ambiente en México: En resumen*. México. Gobierno Federal. (www.semarnat.gob.mx) pp. 20-23.
- Seoáñez, C. M. (2005). *Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo*. Ediciones, Mundi. Prensa. España. Pp. 464.
- Sigler W. A y Bauder, J. (2011). *Nitrato y Nitrito*. Universidad Estatal de Montana. Programa de extensión en calidad del agua. Departamento de recursos de la tierra y ciencias ambientales. USA.
- Smith T.M y Smith, R. L. (2007). *Ecología*. Ed. Pearson Addison. Wesley. Madrid. España. 776 p.
- Spalletti, L. A. (2007). *Cátedra de sedimentología*. Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata. Argentina.
- Suarez, D. L., 1981. Relation between pHc and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternative method of estimating SAR of soil or drainage waters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:469-475
- USGS. EPA. (2004). *La ciencia del agua*. <http://water.usgs.gov/gotita/earthswuse.html>
- Valdez, A. C. J. (2015). *Composición iónica de boro, nitrógeno, fosforo de las aguas del valle del Mezquital*. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. México.
- Velázquez, M. M., Ortega, E. H, M., Martínez, A. G., Kohashi, J. S. y García, N. C. (2002). Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del valle del Mezquital, Hidalgo. México. *Terra* 20:459-464. Pp.
- Wescor, (1985). *User`s manual vapor pressure osmometer*. Wescor model 5500. USA. 16 p.
- Wilcox, L.V. (1948). *The quality of water for irrigation use*. US Department of Agriculture. *Tech. Bulletin* 962, 40 pp.
- Williams, L. G. (2012). *El bosque de niebla del centro de Veracruz: ecología, historia y destino en tiempos de fragmentación y cambio climático*. Versión electrónica. CONABIO. Instituto de Ecología, A.C., Xalapa, Veracruz, México. 208 pp.
- Zapata, H. R. (2006). *Química de los procesos pedogenéticos*. Escuela de geociencias. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Colombia.