



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSGRADO DE HIDROCIENCIAS

**COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS DEL
CAUCE TULA-MOCTEZUMA-CLARO, ESTADO
DE HIDALGO.**

ROSA MARÍA RÍOS TRUJILLO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO EDO. DE MÉXICO

2009

La presente tesis titulada: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS DEL CAUCE FLUVIAL TULA-MOCTEZUMA-CLARO, ESTADO DE HIDALGO, realizada por la alumna: ROSA MARÍA RÍOS TRUJILLO, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: DR. HÉCTOR MANUEL ORTEGA ESCOBAR

ASESOR: DR. CARLOS RAMÍREZ AYALA

ASESOR: DR. CARLOS TREJO LÓPEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, julio de 2009.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS DEL CAUCE FLUVIAL TULA-MOCTEZUMA-CLARO, ESTADO DE HIDALGO.

ROSA MARÍA RÍOS TRUJILLO, M C.
COLEGIO DE POSGRADUADOS, 2009.

Las aguas superficiales que circulan en el cauce fluvial Tula–Moctezuma-Claro riegan zonas agrícolas de Tepéji del Río, Valle del Mezquital, Hidalgo y Tamazunchale, S. L. P. Se recolectaron muestras de agua en estaciones de muestreo; 35 en primavera 2006 y 47 en otoño 2007. Con los valores analíticos químicamente determinados se establecieron las siguientes relaciones funcionales: miligramos por litro-conductividad eléctrica $\text{mg L}^{-1} = f(\text{CE})$; presión osmótica-conductividad eléctrica $\text{MPa} = f(\text{CE})$. Se evaluaron los valores de la Relación de Adsorción de Sodio en sus diferentes formulaciones: Relación de Adsorción de Sodio explícita RAS, Relación de Adsorción de Sodio Ajustada RASaj y Relación de Adsorción de Sodio corregida RAS°. Con las variables medidas y calculadas de cada muestra de agua se estableció: concentración total de sólidos disueltos $\text{mg L}^{-1} = 90\text{-}800\text{-}1500$, presión osmótica = $0.005\text{-}0.050\text{-}0.080$ MPa, pH = $7.10\text{-}7.60\text{-}7.90$, CSR = $0.46\text{-}1.39\text{-}4.22$ mmolc L^{-1} y composición iónica Cl – SO₄ – HCO₃. Estas aguas son clorhídrico-sulfático bicarbonatadas. El contenido de bicarbonatos en su relación $\text{HCO}_3 / \text{Cl} + \text{SO}_4 = 1.0\text{-}2.5\text{-}3.17$, contenido de boro = $0.5\text{-}2.5\text{-}3.5$ mg L^{-1} y contenido de fosfatos PO₄ = $0.2\text{-}0.4\text{-}1.4$ mg L^{-1} .

En el cauce pluvial Tula-Moctezuma-Claro se presentan tres tramos bien definidos en lo que se refiere a la composición química dentro del cauce fluvial Tula-Moctezuma-Claro: 1 En el tramo presa Taximhay-presa Requena las aguas son cálcico-magnésicos-bicarbonatadas, 2 En el tramo presa Requena-presa Zimapán las aguas son sódico-bicarbonatadas y 3 En el tramo Presa Zimapán-Claro las aguas son cálcico-magnésico-sulfático-bicarbonatadas.

Palabras clave: salinidad, sodicidad RAS, Carbonato de Sodio Residual (CSR).

**CHEMICAL COMPOSITION OF THE WATERS OF THE FLUVIAL BED TULA-
MOCTEZUMA-CLARO, HIDALGO STATE.
ROSA MARÍA RÍOS TRUJILLO, M C.
COLEGIO DE POSGRADUADOS, 2009.**

The superficial waters that circulate in the Tula-Moctezuma-Claro fluvial bed water agricultural areas of Tepeji del Rio, Valley of the Mezquital, Hidalgo and Tamazunchale, S. L. P. Samples of water in sampling stations were collected; 35 in spring 2006 and 47 in autumn 2007. With the chemically determined analytic values the following relationships settled down: $\text{mg L}^{-1} = f(\text{CE})$; osmotic pressure $\text{MPa} = f(\text{CE})$. The values of the Sodium Adsorption Ratio were evaluated in their different formulations were evaluated: explicit Sodium Adsorption Ratio RAS, adjusted Sodium Adsorption Ratio, RAS_{aj} and corrected Sodium Adsorption Ratio RAS° . With the variables measures and calculated of each sample of water we established: Total concentration of dissolved solids $\text{mg L}^{-1} = 90\text{-}800\text{-}1500$, osmotic pressure $\text{MPa} = 0.005\text{-}0.050\text{-}0.080$, $\text{pH} = 7.10\text{-}7.60\text{-}7.90$, $\text{CSR} = 0.46\text{-}1.39\text{-}4.22$ mmolc L^{-1} and ionic composition $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$. These waters are hydrochloric-sulphatic-bicarbonated. The content of bicarbonates in their relationship $\text{HCO}_3/\text{Cl} + \text{SO}_4 = 1.0\text{-}2.5\text{-}3.17$, content of boron = $0.5\text{-}2.5\text{-}3.5$ mg L^{-1} and content of phosphates $\text{PO}_4 = 0.2\text{-}0.4\text{-}1.4$ mg L^{-1} .

In the Tula-Moctezuma-Claro pluvial bed three well defined stretches are presented in what refers to the chemical composition inside the Tula-Moctezuma-Claro fluvial bed: 1 In the Taximay dam-Requena dam stretch the waters are calcic-magnesian-bicarbonated, 2 In the Requena dam-Zimapan dam stretch the waters are sodium-bicarbonated and 3 In the Zimapan-Claro dam stretch the waters are calcic-magnesian-sulphatic-bicarbonated.

Key words: *salinity, sodicity, RAS, Carbonate of Residual Sodium (CSR).*

AGRADECIMIENTOS

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la ayuda económica para la realización de mis estudios de Maestría.

Al Colegio de Posgraduados por haberme permitido realizar estos estudios.

Al Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar por su enseñanza, paciencia y tiempo brindados, para realizar este trabajo.

Al Dr. Carlos Ramírez Ayala por su enseñanza, paciencia y tiempo brindados, para realizar este trabajo.

Al Dr. Carlos Trejo López por su valiosa revisión en este trabajo.

La Sra. Elvira Amalia Sosa Galán por su infinita ayuda.

Al personal de laboratorios por su infinita ayuda.

INDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	RESUMEN	4
III.	REVISIÓN DE LITERATURA	6
3.1	GEOQUÍMICA DE LOS ELEMENTOS Y SUS COMPUESTOS QUE PARTICIPAN EN LAS SOLUCIONES ACUOSAS DE LOS SUELOS Y DE LAS AGUAS SUPERFICIALES.	6
3.2.	SOLUBILIDAD DE LAS SALES NOCIVAS EN EL AGUA.	14
3.2.1.	SOLUBILIDAD DE LAS SALES MÁS IMPORTANTES.	14
3.3.	LAS SALES SOLUBLES MÁS IMPORTANTES EN SUELOS Y AGUAS DE LAS ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS.	16
3.4.	CALIDAD DE LAS AGUAS PARA RIEGO.	19
3.5.	PELIGRO DE SALINIZACIÓN DE LOS SUELOS.	20
3.6.	PELIGRO DE SODIFICACIÓN DE LOS SUELOS.	21
3.7.	PROBLEMAS DE INFILTRACIÓN EN LOS SUELOS AGRÍCOLAS BAJO RIEGO.	23
3.8.	EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES BICARBONATOS Y CARBONATOS	29
3.9.	ÍNDICE DE SALINIDAD EFECTIVA (S.E.).	33
3.10.	ÍNDICE DE SALINIDAD POTENCIAL (SP).	35
3.11	HIPÓTESIS DE TRABAJO.	37
IV.	MATERIALES Y MÉTODOS	38
4.1	DESCRIPCIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA EN ESTUDIO.	38
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	45
5.1	ESTACIONES DE MUESTREO Y COMPOSICIÓN IÓNICA.	45
5.1.1	MUESTREO 1 PRIMAVERA 2006.	45
5.1.2	MUESTREO 2 OTOÑO 2007.	52
5.2	CONCENTRACIÓN DE SALES EN LAS MUESTRAS DE AGUA mg L ⁻¹ .	61
5.2.1	MUESTREO 1 PRIMAVERA 2006.	61
5.2.2	MUESTREO 2 OTOÑO 2007.	63
5.3	CONCENTRACIONES DE CATIONES EN LAS MUESTRAS DE AGUA mmolc L ⁻¹ .	65
5.3.1	MUESTREO 1 PRIMAVERA 2006.	65
5.3.2	MUESTREO 2 OTOÑO 2007.	65
5.4	CONCENTRACIÓN DE ANIONES EN LAS MUESTRAS DE AGUA mmolc L ⁻¹	68
5.4.1	MUESTREO 1 PRIMAVERA 2006.	68
5.4.2	MUESTREO 2 OTOÑO 2007.	68
5.5	DEPENDENCIA DE LA PRESIÓN OSMÓTICA CON RESPECTO A LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA PRESIÓN OSMÓTICA (MPa).	71
5.5.1	MUESTREO 1 PRIMAVERA 2006.	71
5.5.2	MUESTREO 2 OTOÑO 2007.	71
5.6.	LA RELACIÓN DE ADSORCIÓN DE SODIO.	75
5.6.1	CAMBIOS EN LA CONDUCTIVIDAD HIDRAÚLICA Y EN LA INFILTRACIÓN DE LOS SUELOS.	82
5.6.2	DISTRIBUCIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES Y MEZCLADAS EN EL DIAGRAMA DE RICHARD.	87

5.6.3 MUESTREO 1. PRIMAVERA 2006.	87
5.6.4 MUESTREO 2. OTOÑO 2007.	90
5.6.5 DEPENDENCIA DE LA INFILTRACIÓN DE LOS SUELOS DE LA RELACIÓN RAS-CE.	93
5.7 ÍNDICES DE CLASIFICACIÓN: SALINIDAD EFECTIVA (SE), SALINIDAD POTENCIAL (SP) Y CARBONATO DE SODIO RESIDUAL (CSR).	93
5.7.1 MUESTREO 1 PRIMAVERA 2006.	95
5.7.2 MUESTREO 2 OTOÑO 2007.	98
5.8 DISTRIBUCIÓN DE LOS ORTOFOSFATOS EN LAS ESTACIONES DE MUESTREO	98
5.8.1 MUESTREO 1 PRIMAVERA 2006.	99
5.8.2 MUESTREO 2 OTOÑO 2007.	99
5.9 DISTRIBUCIÓN DE LOS CONTENIDOS DE BORO mg L ⁻¹ .	102
5.9.1 MUESTREO 1 PRIMAVERA 2006.	102
5.9.2 MUESTREO 2 OTOÑO 2007.	102
VI. CONCLUSIONES.	106
VII. RECOMENDACIONES.	107
VIII. LITERATURA CITADA.	108

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Solubilidad Máxima de algunas sales que se han encontrado en aguas naturales.	14
Cuadro 2. Procedimiento para calcular el pHc teórico calculado de las aguas de riego .	28
Cuadro 3. Concentración de calcio (Ca ^o) en el agua del suelo.	30
Cuadro 4. Directrices para interpretar la calidad de las aguas de riego.	31
Cuadro 5. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo con el “índice” salinidad efectiva.	35
Cuadro 6. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo con el “índice” de salinidad potencial.	35
Cuadro 7. Métodos analíticos utilizados para caracterizar las aguas.	42
Cuadro 8. Porcentajes de diferencia aceptable para las diferentes determinaciones.	44
Cuadro 9. Localización geográfica de las estaciones de muestreo el cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro. Estados de Hidalgo y San Luis Potosí. México Muestreo 1. Primavera 2006.	46
Cuadro 10. Composición iónica en las aguas que circulan en el cauce general Río-Tula-Río Moctezuma-Río Claro. Estados de Hidalgo y San Luis Potosí. México. Muestreo 1. Primavera 2006.	47
Cuadro 11. Localización geográfica de las estaciones de muestreo de las aguas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro. Estados de Hidalgo y San Luis Potosí México. Muestreo 2 Otoño 2007.	53
Cuadro 12. Composición iónica en las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro. Estados de Hidalgo y San Luis Potosí, México. Muestreo 2 Otoño 2007.	55
Cuadro 13. Influencia de los cationes adsorbidos en las diferentes propiedades físicas de los suelos (Gorbunov, 1967, citado por Ortega, 1993).	77
Cuadro 14. Distribución en grupos de las aguas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, de acuerdo con su concentración y con los valores de los diferentes RAS, expresados en porcentajes. Muestreo 1 Primavera 2006.	89
Cuadro 15. Distribución en grupos de las aguas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, de acuerdo con su concentración y con los valores de los diferentes RAS, expresados en porcentajes. Muestreo 2 Otoño 2007.	91
Cuadro 16. Valores de la salinidad efectiva y de la salinidad potencial en las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro. Estados de Hidalgo y San Luis Potosí. México, Muestreo 1 Primavera 2006.	96
Cuadro 17. Valores de la salinidad efectiva y de la salinidad potencial en las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro. Estados de Hidalgo y San Luis Potosí. México, Muestreo 2 Otoño 2007.	97

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica de las estaciones de muestreo.	41
Figura 2. Composición iónica de las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, Estados de Hidalgo y San Luis Potosí, México, Muestreo 1 Primavera 2006.	51
Figura 3. Composición iónica de las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, Estados de Hidalgo y San Luis Potosí, México, Muestreo 2 Otoño 2007.	60
Figura 4. Relación entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y la concentración (mg L^{-1}) en las aguas de las estaciones de muestreo del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro. Estados de Hidalgo y San Luis Potosí, México. Muestreo 1. Primavera 2006.	62
Figura 5. Relación entre la concentración de sólidos totales (mg L^{-1}) y la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) en las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Río Moctezuma-Río Claro, Estados de Hidalgo y San Luis Potosí. México. Muestreo 2. Otoño 2007.	64
Figura 6. Relación entre la concentración de cationes (mmolc cm^{-1}) y la conductividad eléctrica (mS cm^{-1}) en las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma Río Claro, Estados de Hidalgo y San Luis Potosí. México. Muestreo 1. Primavera 2006.	66
Figura 7. Relación entre la concentración de cationes (mmolc cm^{-1}) y la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) en las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma Río Claro, Estados de Hidalgo y San Luis Potosí. México. Muestreo 2. Otoño 2007.	67
Figura 8. Relación entre la concentración de aniones (mmolc cm^{-1}) y la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) en las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma Río Claro, Estados de Hidalgo y San Luis Potosí. México. Muestreo 1. Primavera 2006.	69
Figura 9. Relación entre la concentración de aniones (mmolc cm^{-1}) y la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) en las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma Río Claro, Estados de Hidalgo y San Luis Potosí. México. Muestreo 1. Primavera 2006.	70
Figura 10. Relación entre la conductividad eléctrica (m S cm^{-1}) y la presión osmótica (Mpa) de las estaciones de muestreo del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro. Estados de Hidalgo y San Luis Potosí, México. Muestreo 1. Primavera 2006.	72
Figura 11. Relación entre la conductividad eléctrica (m S cm^{-1}) y la presión osmótica (Mpa) de las estaciones de muestreo del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro. Estados de Hidalgo y San Luis Potosí, México. Muestreo 2. Otoño 2007.	74
Figura 12. Diagrama de la clasificación de las aguas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, en los estados de Hidalgo y San Luis Potosí, México RAS _{or} -CE, RAS _{aj} -CE y RAS ^o -CE.	88
Figura 13. Reducción relativa de la infiltración, provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio.	94

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente se estima que de los 72000 millones de metros cúbicos de agua que se utilizan en el país, el 78% se destina a la agricultura de riego, calculada en mas de seis millones de hectáreas que se subdividen a su vez en 48 distritos y en 39500 unidades de riego. Los distritos de Riego 088 Chiconautla, Estado de México, 03 Tula y 100 Alfajayucan en el Estado de Hidalgo se riegan con aguas residuales urbano-industriales de la ciudad de México. Estas aguas residuales se utilizan para el riego del valle del mezquital prácticamente sin ningún tratamiento.

Las aguas residuales después de su uso en el riego de cultivos del valle del mezquital en diferentes tramos de este valle se vierten en el cauce del Río Tula, tal es el caso de los tramos Tula-Progreso, Chilcuautla-Ixmiquilpan. El Río Tula conduce aguas de escurrimiento natural, desde la Presa Taximhay hasta las primeras afluencias de aguas residuales en la zona de Tepeji del Río, Estado de Hidalgo. El Río Tula deriva sus aguas mezcladas en el Río Moctezuma hasta la Presa Zimapán. El Río Moctezuma recibe aguas de la sierra madre oriental en el tramo Zimapán-Río Claro.

La agricultura de riego depende de la calidad y cantidad de agua disponible. En los últimos decenios se le ha dado mucha importancia a la calidad del agua para riego debido a que en la actualidad, en la práctica agrícola, se utilizan aguas subterráneas, aguas superficiales (ríos, lagos, lagunas) y manantiales de la más variada composición química. Las aguas de los ríos en general, se retienen en diferentes embalses, para después ser utilizadas en las zonas agrícolas bajo riego. Algunos embalses, como la Presa Zimapán, reciben aguas mezcladas de escurrimientos naturales y de aguas residuales del Valle del Mezquital. Se ha hecho un uso intensivo para el riego de prácticamente todas las aguas de buena calidad, lo anterior porque, la necesidad de agua para el riego de nuevas áreas agrícolas ha estado aumentando en los últimos años, por este motivo, se ha hecho necesario recurrir a fuentes de agua de menor calidad. Para determinar la factibilidad del uso de una determinada agua de riego, es necesario que se tomen en cuenta los siguientes factores: a. Composición química, b. Las particularidades de los cultivos agrícolas, c. El

1 | zona agrícola bajo riego d. Las

propiedades físicas de los suelos y e. Los métodos agronómicos que se utilizan en la explotación de los diferentes cultivos agrícolas (Kovda, *et. al.*, 1967; Oster

y Rhoades, 1986). La interdependencia de estos cinco factores, determina la posibilidad de uso de una fuente de agua para el riego de los cultivos agrícolas. La calidad del agua de riego puede variar significativamente según el tipo y calidad de las sales disueltas. Las sales se encuentran en cantidades relativamente pequeñas pero significativas y por lo general tienen su origen en la disolución e intemperización de las rocas de la corteza terrestre, además de la disolución lenta de calizas, de yeso y de otros minerales. Los diferentes tipos de sales se transportan disueltas en el agua y son depositadas en los suelos de zonas bajas y suelos de distintas áreas bajo riego. A medida que el agua se evapora o es absorbida por los cultivos agrícolas, las sales se depositan en los espesores de los suelos (Bernstein y Francois, 1973). Los problemas que se presentan durante el uso de aguas para riego de diferente calidad son por consiguiente: a. Salinidad, b. Problemas de infiltración, c. Toxicidad de iones específicos, como el boro, cloro o sodio. d. Exceso de nutrimentos como nitratos y fosfatos (Ramalho, 1998), y el caso particular de aguas mezcladas que están formadas con aguas de escurrimientos naturales y aguas residuales de diferentes usos urbano-industriales; un problema adicional son los metales pesados (plomo, zinc, cadmio, mercurio, entre otros). En virtud de que para el riego de los cultivos agrícolas se utilizan aguas de diferente calidad, es necesario considerar distintos índices como RAS, CE, Salinidad Efectiva y Salinidad Potencial, para su clasificación, que por sus características, serán diferentes de aquellos índices que se utilizan con fines geoquímicos, de uso industrial y de sanidad pública. En la actualidad, no es posible proponer una clasificación única de aguas para riego, que incluya una serie de índices y que pueda utilizarse como universal en cualquier tipo de condiciones de los suelos agrícolas. Los suelos que se utilizan en la agricultura son de origen muy variado y por lo tanto poseen diferentes composiciones

mineralógicas, de ahí que por lo tanto, la respuesta que van a tener los suelos será diferente cuando se apliquen a éstos aguas de riego de una determinada composición química. Caracterizar las aguas de los cauces de los Ríos Tula-Río-Moctezuma-Río Claro es muy importante ya que este cauce conduce aguas superficiales de baja concentración que se embalsan en la presa Taximhay y aguas mezcladas en los tramos Tepeji del Río-Ixmiquilpan. En el tramo Zimapán-Río Claro, las aguas mezcladas reciben considerables aportaciones de escurrimientos de las Sierra Madre Oriental. Las aguas que derivan de la Sierra Madre Oriental son de composición calcio-magnésicas.

II. RESUMEN

De todas las actividades económicas que realiza el ser humano, la agricultura bajo riego es la que más agua utiliza con un 78% del volumen total estimado en 72 mil millones de m³; entre las fuentes de agua utilizadas figuran: las superficiales y subterráneas. Día con día la calidad de ambas fuentes se ve afectada negativamente por todo tipo de residuos orgánicos y minerales, sólidos, líquidos y gaseosos, que son generados por otras actividades económicas y vertidos directamente al suelo, agua y atmósfera. Sin embargo de manera voluntaria una gran cantidad de productos químicos son utilizados directamente como una medida de conservación de la fertilidad del suelo o bien son aplicadas para el control de malezas, plagas, enfermedades o depredadores de las especies cultivadas. Sea cual fuere el origen y forma de manejo todos estos compuestos orgánicos e inorgánicos en algún momento hacen disminuir la calidad de las fuentes de agua de las soluciones del suelo.

El problema de la pérdida de calidad del recurso agua y dicho sea de paso del resto de los recursos naturales que intervienen en el proceso de producción de alimentos, este problema va en aumento, de tal manera que es importante estudiar y comprender como las concentraciones, formas químicas, movilidad y el impacto que cada uno de los diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos tienen en el medio ambiente.

En este estudio, se hace una evaluación de la calidad del agua que circula en los cauces del Río Tula, desde la presa Taximhay, hasta su confluencia con el cauce del Río Claro con el cauce del Río Moctezuma. En este recorrido; durante la toma de muestras de agua en diferentes estaciones de muestreo, por los cauces de los Ríos Tula–Moctezuma-Claro, fue notable observar que el cauce general de estos ríos atraviesa dos formaciones geológicas: la formación geológica del Eje Neovolcánico y la formación geológica de la Sierra Madre Oriental; la formación geológica del Eje Neovolcánico está formada por bocas de explosión, corrimientos

de lava basáltica y de diferentes depósitos de escórias y tobas, en cambio la formación geológica de la Sierra Madre Oriental está formada predominantemente por depósitos de calizas del terciario y del pli-pleistoceno. Al cauce del Río Tula se vierten las aguas residuales del Valle del Mezquital. Las aguas residuales de riego del Valle del Mezquital se embalsan generalmente en la presa Zimapán, las aguas mezcladas del escurrimiento natural del Río Tula, así como las aguas residuales de riego del Valle del Mezquital siguen un curso en forma conjunta por el cauce del Río Moctezuma.

En el tramo del cauce Río Moctezuma-Río Claro, las aguas mezcladas del Río Moctezuma, reciben numerosos afluentes que derivan de la Sierra Madre Oriental.

Estas aguas que poseen altas concentraciones de calcio modifican sensiblemente la calidad de las aguas del Río Moctezuma.

En cada estación de muestreo del cauce del Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, se tomaron muestras de agua de 0.5L por duplicado.

Los parámetros que se evaluaron son: la concentración ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), la conductividad eléctrica (CE), la Presión Osmótica (PO). La Relación de Adsorción de Sodio (RAS), la Salinidad Efectiva (SE), la Salinidad Potencial (SP), el Carbonato de Sodio Residual (CSR), así como los contenidos de Fósforo (P) y de Boro (B); por lo que estos permiten establecer y definir la calidad del agua. Además en todas las muestras de agua se determinó su composición química que comprende la determinación de los siguientes iones: Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} , K^{+} , CO_3^{-2} , HCO_3^{-} , Cl^{-} y SO_4^{-2} .

III. REVISION DE LITERATURA

La diversidad de concentraciones iónicas en las aguas superficiales se debe a los contenidos mineralógicos de las rocas que atraviesan estas aguas durante su escurrimiento hacia las depresiones oceánicas (Kovda *et. al.*, 1967); durante

este transcurso, las aguas superficiales pasan por diferentes formaciones geológicas y debido a los procesos de intemperismo de las rocas, las soluciones acuosas se enriquecen con diferentes elementos químicos. Sin embargo, de debe señalar también que, cuando los diferentes compuestos salinos presentes en los suelos y en las aguas superficiales alcanzan concentraciones límite, éstos se precipitan. Como por ejemplo sales de carbonato, bicarbonato o sales de sulfato entre otras (Bower y Wilcox,1965). Así, los procesos de disolución y de precipitación modifican la concentración y composición de las aguas superficiales.

La presente revisión bibliográfica está orientada a analizar el origen de los elementos que forman las sales disueltas en las aguas superficiales, así mismo, persigue establecer los fundamentos de los distintos índices de clasificación de las aguas para riego, tanto superficiales como subterráneas.

3.1 GEOQUÍMICA DE LOS ELEMENTOS Y SUS COMPUESTOS QUE PARTICIPAN EN LAS SOLUCIONES ACUOSAS DE LOS SUELOS Y DE LAS AGUAS SUPERFICIALES.

Los elementos que participan en las soluciones de las aguas superficiales, freáticas, acuíferas, marinas y de los suelos, son: calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), potasio (K), oxígeno (O), cloro (Cl), azufre (S), carbono (C), nitrógeno (N), boro (B), y otros (Huez, 1985).

En el caso particular de las aguas urbano-industriales de la ciudad de México se deben mencionar los metales pesados (plomo, zinc, cadmio, mercurio, etc, etc.) como se mencionó anteriormente.

a

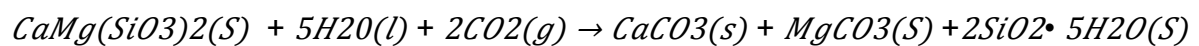
Las aguas residuales de la ciudad de México ingresan al Río Tula en el tramo Río Salado-Ixmiquilpan. El cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro conduce a 6 zcaldas de diferente calidad, las aguas mezcladas son de diferente concentración.

Calcio (Ca).

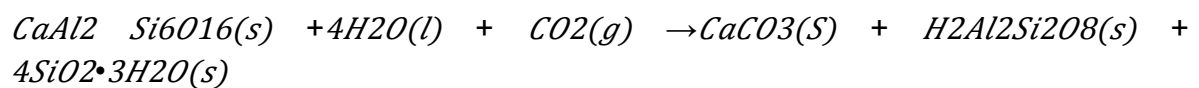
En la corteza terrestre se tiene un 3.2 % de calcio. Es uno de los elementos ampliamente difundidos durante la cristalización de la magma, y está en la composición de las rocas básicas y en menor cantidad en las rocas ácidas. El contenido del calcio en los basaltos alcanza un 6.4% y en los granitos disminuye hasta 1.55%. El calcio se encuentra en la composición de las augitas, anfíboles,

anortitas y de las plagioclasas (Kovda *et al.*, 1967), (Szabolcs, 1989).

El intemperismo de los silicatos de calcio ocurre de la siguiente manera:



El intemperismo de los aluminosilicatos que contienen calcio ocurre de acuerdo con el siguiente esquema:

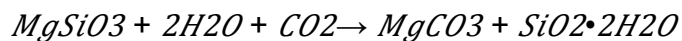


El $CaCO_3$ que se ha formado durante el intemperismo de los minerales que contienen calcio, y en presencia de CO_2 , pasa a una forma más soluble como bicarbonato de calcio $Ca(HCO_3)_2$.

Las sales solubles de calcio: $Ca(HCO_3)_2$, $CaCl_2$, $Ca(NO_3)_2$, se acumulan en las aguas naturales: superficiales, freáticas y de los suelos y con el flujo de éstas ingresan a las depresiones internas, mares y océanos. Una parte del calcio, como resultado de la evaporación de las soluciones y de las reacciones de intercambio se precipitan, formando: calcita ($CaCO_3$), yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), anhídrita ($CaSO_4$), gaylusita ($CaCO_3Na_2CO_3 \cdot 5H_2O$), ⁷ ita $CaMg(CO_3)_2$ y otras que entran en la composición de las rocas sedimentarias, marinas y en la composición de los suelos.

Magnesio (Mg).

El contenido de magnesio en la corteza terrestre es igual a 2.07%. Así como el calcio, el magnesio está contenido en grandes cantidades en el magma. Se encuentra mucho en las rocas básicas y ultrabásicas. En el basalto su contenido es igual a 3.77%, y en los piroxenos el contenido de este elemento alcanza 10.9%. En las rocas de magma ácida su contenido es menor que el del calcio. Durante el intemperismo de los silicatos magnésicos se forma carbonato de magnesio.



Durante el intemperismo de los feldespatos, en condiciones de una reacción alcalina se forma montmorillonita, hidrómicas y otros minerales arcillosos. Las sales $MgSO_4$ y $MgCl_2$ son muy solubles en el agua, el $Mg(HCO_3)_2$ es menos soluble y el $MgCO_3$ es débilmente soluble. Las sales de magnesio que se solubilizan en las aguas superficiales, freáticas y en los suelos, participan en los grandes ciclos de migración en la corteza terrestre (Huez, 1985). En las rocas sedimentarias y en los suelos, el magnesio se acumula en forma de minerales salinos: magnesita $MgCO_3 \cdot H_2O$, dolomita $CaMg(CO_3)_2$, epsomita $MgSO_4 \cdot 7H_2O$,

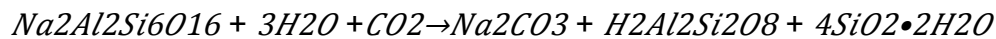
kieserita $MgSO_4 \cdot H_2O$, astrakanita $NaSO_4MgSO_4 \cdot 4H_2O$, carnalita $KClMgCl_2 \cdot 6H_2O$, kainita $KClMgSO_4 \cdot 3H_2O$ y otras (Kovda *et. al.*, 1967).

Sodio (Na).

Su contenido en la corteza terrestre es de 2.35%. En las rocas de la magma alcalina el contenido de Na + K es de 15 – 20%, y en los basaltos se encuentra en 2.31%. El sodio se encuentra en la albita, plagioclasa, leicitita, nefelino y en los minerales que contienen cloro como: sodolita y nosean.

8

El intemperismo de los aluminosilicatos que contienen sodio ocurre de acuerdo con el siguiente esquema:



Los Na_2CO_3 y $NaHCO_3$ que se han formado pueden reaccionar con los ácidos y sales, formando $NaCl$, Na_2SO_4 , $NaNO_3$ y Na_2SiO_3 . Durante el intemperismo de minerales que contienen cloro el sodio se presenta como Na_2SO_4 (Szabolcs, 1989).

Las sales de sodio se encuentran en grandes cantidades en las aguas freáticas de las regiones semidesérticas y desérticas. La mineralización de las aguas freáticas en las zonas áridas varía de 1-2 hasta 100-200 g L⁻¹. Además, cuando las concentraciones son muy altas, en la composición de sales predomina el NaCl y Na_2SO_4 . Por otra parte, generalmente se acumulan las sales de NaCl y de Na_2SO_4 en los suelos sódicos y salinos. De tal forma que el ion sodio (Na) se encuentra en la composición de los cationes adsorbidos (20-30-60% y más)

(Szabolcs, 1989; Bingham *et. al.*, 1979). Asimismo, una fracción del sodio

adsorbido puede pasar a la solución del suelo donde reacciona con el CO_3^{2-} y HCO_3^- ; para formar carbonato y bicarbonato de sodio.

Los suelos salinos contienen hasta 2.0-3.0% de sales de sodio, las costras salinas pueden contener hasta 10-20%. Los siguientes minerales de sodio son los más ampliamente distribuidos y se precipitan durante la evaporación de las aguas de los suelos, freáticas y superficiales: halita (NaCl), mirabilita (Na_2SO_4), salitre sódico ($NaNO_3$), termonatrita ($Na_2CO_3 \cdot H_2O$), soda ($Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$), trona ($Na_2CO_3NaHCO_3 \cdot 2H_2O$), glauberita ($2Na_2SO_4Na_2CO_3$) y gaylusita ($CaCO_3Na_2CO_3 \cdot 5H_2O$). (Antipov-Karataev., 1967., Szabolcs, 1989).

9

Potasio (K).

La corteza terrestre contiene 2.27% de potasio. Al igual que el sodio, se encuentra en la composición de las rocas ácidas y básicas. En las rocas ácidas se encuentra en mayor cantidad que el sodio, en las rocas básicas y alcalinas el contenido de éste elemento es menor si se compara con el contenido de sodio. En los basaltos su contenido es de 1.2%. El potasio está en la composición de la ortoclasa, muscovita y como trazas se encuentra en las plagioclasas y en la albita.

En los procesos de intemperismo de los aluminosilicatos que contienen potasio, las reacciones ocurren de acuerdo con la siguiente ecuación:



Los carbonatos de potasio cuando interactúan con los ácidos y con las sales se transforman en cloruros, sulfatos y nitratos. En la hidrósfera, el potasio es de

menor contenido que el sodio. Esto está relacionado con la resistencia al intemperismo de los minerales potásicos.

En los suelos salinos y sódicos, el potasio adsorbido es considerablemente menor que el sodio debido a su bajo contenido en las aguas superficiales, freáticas y de los suelos (Richards, 1973).

Las sales minerales del potasio son: silvita (KCl), carnalita ($KClMgCl_2 \cdot 6H_2O$), kainita ($KClMgSO_4 \cdot 4H_2O$) y salitre potásico (KN_3).

Cloro (Cl).

El contenido de cloro en la corteza terrestre es de 0.10%. En las rocas extrusivas es de 0.05% y en las rocas alcalinas 0.7%. La mayor cantidad se encuentra en la hidrósfera, alrededor de 60% de las reservas totales.

La fuente principal de este elemento en las aguas oceánicas son emanaciones gaseosas primarias de los volcanes y la emanación secundaria de las lavas durante su enfriamiento.

Una considerable cantidad ingresa a las depresiones oceánicas en forma de cloruros que han sido lixiviados de las rocas marinas saturadas con éste ión o de la formación de éstos durante el intemperismo. En la corteza continental, una cantidad se encuentra en las rocas sedimentarias de origen marino y en las rocas continentales. Durante la evaporación de golfos pequeños y lagunas limítrofes al mar, los cloruros de sodio, potasio y magnesio, forman yacimientos de una gran potencia. En las aguas freáticas y de los suelos de las zonas áridas y de regiones sin escurrimientos se encuentran cantidades considerables de este ión.

Los minerales del cloro son: NaCl (halita), KCl (silvita), $MgCl_2 \cdot 5H_2O$, $KClMgCl_2 \cdot 6H_2O$ (carnalita), $KClMgSO_4 \cdot 4H_2O$ (kainita) y cloruros de magnesio y calcio hidratados con una, dos o más, hasta doce moléculas de agua.

El Azufre (S).

El contenido en la corteza terrestre es de 0.06%. En las rocas cristalinas, la cantidad de azufre, en promedio es de 0.05% y en las sedimentarias, es de 0.22%. En las rocas eruptivas, se encuentra en la forma de pirita (FeS_2), gayun ($3NaAlSi_3O_8 \cdot 4H_2O$), ($3NaAlSi_3O_8 \cdot Na_2SO_4$) y otros.

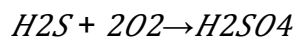
En las rocas sedimentarias predomina en forma de sales del ácido sulfúrico. Sus sales minerales son: yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), anhidrita ($CaSO_4$), kiserita ($MgSO_4$), mirabilita ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$), glauberita ($Na_2SO_4 \cdot CaSO_4$), astrakanita ($Na_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 4H_2O$) y kainita ($KCl \cdot MgSO_4 \cdot 4H_2O$).

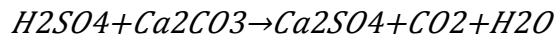
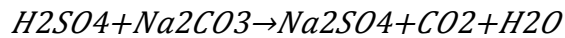
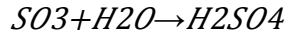
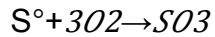
La hidrósfera contiene 0.09%, una cantidad considerable se encuentra en el agua de los océanos. En particular existe ¹¹ s compuestos en las aguas de las lagunas y de los lagos salados. Muchos de éstos se encuentran en las aguas freáticas y en los suelos de las regiones áridas y semiáridas.

Es uno de los elementos importantes en la nutrición vegetal, ya que forma parte de la composición de las proteínas. Participando en el ciclo biológico, durante la descomposición de las proteínas se transforma en ácido sulfhídrico. El ácido sulfhídrico al combinarse con el oxígeno del aire se oxida y forma ácido sulfúrico, en estas condiciones participan bacterias oxidantes aeróbicas del ácido sulfhídrico. A su vez el azufre que se ha formado en condiciones de reducción de sulfatos; enseguida reacciona con algunas cantidades de oxígeno disuelto formando el ión sulfito, posteriormente, el ión sulfito se combina con el agua formando ácido sulfúrico. Estas cantidades de ácido sulfúrico formadas, reaccionan con los carbonatos de los metales alcalino-térreos originándose con esto los sulfatos correspondientes.

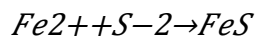
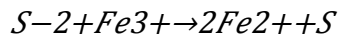
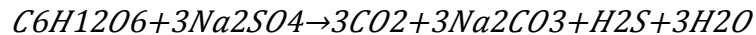
(Szabolcs, 1989).

Oxidación del ácido sulfhídrico hasta ácido sulfúrico:





Reducción de sulfatos en condiciones anaeróbicas.



Cuando no hay suficiente oxígeno, las formas oxidadas del azufre se reducen hasta sulfhídrico.

12

Carbono (C).

Los compuestos del carbono forman la parte más importante en las sustancias orgánicas.

Las sustancias orgánicas se forman en las plantas verdes durante el proceso de fotosíntesis, en donde el bióxido de carbono del aire y como resultado de la absorción de la energía luminosa del sol por la clorofila se une con el hidrógeno que se ha formado durante la descomposición del agua. El oxígeno se despidió hacia el aire. Durante la destrucción de las sustancias orgánicas por los microbios, así como durante la respiración, el bióxido de carbono se forma y se despidió hacia el aire, aunque parcialmente se solubiliza en el agua, ya solubilizado en el agua se asimila éste por las raíces de las plantas participando en la formación de sustancias orgánicas. Bajo la acción de los microorganismos las sustancias orgánicas se transforman en humus.

En las profundidades del planeta los compuestos del carbono forman yacimientos de carbón, petróleo y gas. En la corteza terrestre los compuestos del carbono están distribuidos en forma de carbonatos de calcio, que forman parte de las

calizas y mármoles. Los carbonatos de calcio uniéndose con el magnesio forman las dolomitas $CaMg(CO_3)_2$.

Una gran cantidad de carbonatos, fundamentalmente de $CaCO_3$ y $MgCO_3$ están contenidos en las rocas sedimentarias (los loess contienen hasta 20-25%) (Kovda *et al.*, 1967; Huéz, 1985). En las soluciones acuosas de los suelos sódicos y en

los suelos que se han salinizado se encuentran carbonato y bicarbonato de sodio; los carbonatos de calcio y de magnesio se solubilizan débilmente en el agua, los bicarbonatos de calcio y de magnesio son más solubles en el agua.

Los minerales – sales que contienen carbono y que están ampliamente distribuidos son: calcita ($CaCO_3$), dolomita $CaMg(CO_3)_2$, magnesita ($MgCO_3$), soda (Na_2CO_3), potasa (K_2CO_3) y trona ($Na_2CO_3NaHCO_3 \cdot 2H_2O$).

3.2. SOLUBILIDAD DE LAS SALES NOCIVAS EN EL AGUA.

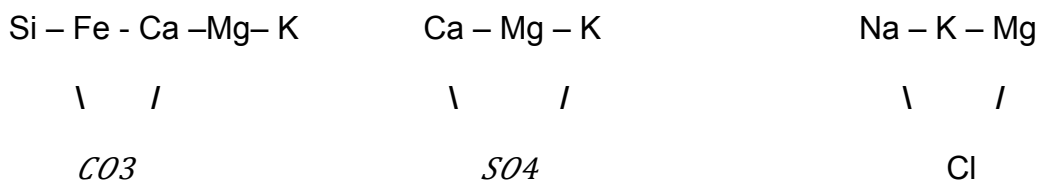
3.2.1. SOLUBILIDAD DE LAS SALES MÁS IMPORTANTES.

Cuando se estudian las composiciones químicas de las aguas naturales, de escurrimiento y subterráneas, así como también aguas freáticas y aguas de los suelos, es muy importante conocer la solubilidad de las diferentes sales. En los procesos de acumulación de sales en los suelos de las cuencas endorreicas es muy importante conocer las diferentes solubilidades que tienen las sales ya que en un proceso de escurrimiento hacia las partes más bajas de las cuencas endorreicas, las diferentes sales solubles se depositan en los suelos de acuerdo con las distintas solubilidades de las sales.

Cuadro 1. Solubilidad Máxima de algunas sales que se han encontrado en aguas naturales y en suelos, en sus diferentes temperaturas.

Sal	En g por 100 g de solución						En g por litro de solución					
	Temperatura en °C						Temperatura en °C					
	0	10	20	30	40	50	0	10	20	30	40	50
Na ₂ CO ₃	6.50	10.90	17.90	28.40	32.40	32.10	70.00	122.00	213.00	371.00	441.00	429.
NaHCO ₃	6.50	7.50	8.70	10.00	11.30	12.70	68.00	80.00	93.00	107.00	121.00	137.
Na ₂ SO ₄	4.30	8.30	16.10	29.00	32.60	31.80	45.00	90.00	185.00	373.00	430.00	415.
NaCl	26.30	26.30	26.40	26.50	26.70	26.90	318.00	317.00	317.00	317.00	318.00	319.
MgSO ₄	18.00	22.00	25.50	28.00	30.80	33.40						
MgCl ₂	38.80	39.80	41.00	48.60	51.80	54.40						
CaCl ₂	37.30	39.40	42.70	50.70	53.40	56.00						
NaNO ₃	42.10	44.40	46.70	49.00	51.20	53.30	570.00	607.00	686.00	686.00	724.00	762.
KNO ₃	11.60	17.50	24.00	31.50	39.00	46.10	125.00	194.00	279.00	384.00	498.00	614.
K ₂ CO ₃	51.70	52.20	52.60	53.20	53.90	54.70	814.00	823.00	829.00	839.00	852.00	867.
KHCO ₃	18.40	21.50	25.20	28.50	32.20	36.00						
K ₂ SO ₄	6.70	8.50	10.00	11.50	12.90	14.20	71.00	91.00	108.00	125.00	142.00	157.
KCl	21.90	23.80	25.60	27.00	28.70	3.01	253.00	277.00	301.00	322.00	341.00	359.

Las sales nocivas para las plantas que se encuentran en la corteza del intemperismo, en los suelos, aguas superficiales y freáticas son: los cloruros de Na, Ca y Mg, los sulfatos de Na y Mg, los carbonatos y bicarbonatos de Na, Mg y Ca. En las rocas sedimentarias, capa 14 intemperismo y suelos, una gran parte de las sales se encuentra en forma cristalina, y durante el humedecimiento, una parte de las sales pasa a la fase líquida. A medida que aumenta la temperatura, la solubilidad de las sales aumenta (*NaHCO₃, K₂SO₄, Na₂SO₄, Na₂CO₃*). La secuencia de las precipitaciones de las sales de una solución policomponente, depende del grado de su solubilidad. Las sales débilmente solubles se precipitan en concentraciones bajas y las sales más solubles se precipitan en concentraciones muy altas. Una regularidad general de precipitación se expresa de la siguiente manera:



Es decir los cationes se precipitan secuencialmente de acuerdo con la serie:

Fe – Si – Ca – Mg – Na – K y los aniones de acuerdo con la serie *CO₃ – SO₄ – Cl*.

Las regularidades de la precipitación de las sales se han estudiado ampliamente en las aguas de altos contenidos salinos. En primer lugar se precipitan los hidróxidos de silicio y fierro, después los carbonatos de calcio y de magnesio, más adelante el yeso y los sulfatos de magnesio, y por último cloruros de sodio, potasio y magnesio (Kovda *et al.*, 1967, Szabolcs, 1989).

En principio los iones de calcio Ca^{2+} , magnesio Mg^{2+} , sodio Na^{+} , potasio K^{+} , carbonato CO_3^{2-} , bicarbonato HCO_3^{-} , cloruro Cl^{-} y sulfato SO_4^{2-} , son extraídos en sus orígenes de las mallas cristalinas de los minerales que conforman las rocas. De tal manera que, se puede señalar, que la concentración relativa de unos iones con respecto a otros dependerá de procesos específicos que se presenten en las soluciones de las aguas de riego (Ayers y Wescot, 1987).

3.3. LAS SALES SOLUBLES MÁS IMPORTANTES EN SUELOS Y AGUAS DE LAS ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS.

Las sales del ácido carbónico. Las sales del ácido carbónico se encuentran ampliamente en los suelos y aguas freáticas de los desiertos, semidesiertos y estepas e inclusive en las estepas boscosas. El efecto de estas sales en grado considerable depende de su composición, cantidades de sales que se acumulan en los suelos, grado de su solubilidad y toxicidad para las plantas así como también de su efecto en el régimen hídrico de las plantas.

Carbonato de calcio. Este es de muy baja solubilidad (0.013 g/l). La solubilidad del carbonato de calcio en presencia del ácido carbónico, aumenta considerablemente gracias a la formación de bicarbonatos de calcio, de acuerdo a la reacción: $CaCO_3 + H_2CO_3 = Ca(HCO_3)_2$. Debido a la baja solubilidad del carbonato de calcio éste es prácticamente no nocivo para la mayoría de las plantas.

Carbonato de magnesio. El carbonato de magnesio se caracteriza por una mayor solubilidad que el carbonato de calcio. En presencia de ácido carbónico, gracias a la formación de bicarbonatos de magnesio, la solubilidad del $MgCO_3$ fuertemente aumenta. Siendo el carbonato de magnesio una sal de una base fuerte y de un ácido débil, el carbonato de magnesio en el proceso de hidrolización le da a la solución valores de alta alcalinidad (hasta pH = 9-10).

Carbonato de sodio. Las sales del ácido carbónico y sodio ampliamente se encuentran en la naturaleza y se acumulan en los suelos a veces en cantidades considerables.

El carbonato de sodio existe en los suelos y en las aguas freáticas en distintas modificaciones. El carbonato de sodio es una sal del ácido carbónico y sodio, o sea Na_2CO_3 .

En los suelos ésta sal se cristaliza con diferentes cantidades de agua: $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$, $Na_2CO_3 \cdot H_2O$, ¹⁶ (Na_2CO_3) es un compuesto de alta solubilidad 178 g/l en 20°C. Gracias a la hidrolización de la soda, ésta provoca una alta alcalinización del medio, hasta pH = 10 -12. Debido a su alta alcalinidad y solubilidad, la soda es altamente tóxica para la mayoría de las plantas. La presencia de la soda en las soluciones de los suelos provoca la peptización de los coloides de los suelos. El bicarbonato de sodio se caracteriza por una menor alcalinidad y toxicidad en comparación con la soda normal (Na_2CO_3). Durante la evaporación de las aguas freáticas que contienen carbonatos y bicarbonatos de sodio de la solución del suelo se precipitan y se acumulan en los suelos cristales de una sal doble $NaHCO_3$.

Carbonato de potasio. El carbonato de potasio existe en los suelos en cantidades mucho más pequeñas que el carbonato de sodio.

Sales del ácido sulfúrico. Sulfatos. Las sales del ácido sulfúrico se encuentran en grandes y pequeñas cantidades casi en todos los suelos. En los suelos y aguas

freáticas de las estepas y desiertos, los sulfatos a veces se acumulan considerablemente. El valor agronómico o de mejoramiento de los sulfatos, fuertemente cambia en función del catión acompañante.

Sulfato de Calcio. El sulfato de calcio (yeso) es una sal que desde el punto de vista fisiológico no es nociva para las plantas. Esto se debe a la solubilidad; ya que ésta no es muy grande (1.9 g / l).

Sulfato de magnesio. El sulfato de magnesio EPSOMITA $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ es un componente típico de los suelos salinos, que se acumulan en éstos en cantidades de algunos porcientos. Debido a su alta solubilidad, el sulfato de magnesio (252 g / l) se caracteriza por su extremada toxicidad y es una de las sales más nocivas para las plantas.

Sulfato de sodio. El sulfato de sodio es una sal de los suelos salinos, aguas freáticas salinas y lagos. La ¹⁷ sulfato de sodio es dos o tres veces menor que la del sulfato de magnesio. Debido a los cambios de su solubilidad en función de la temperatura, el comportamiento del sulfato de sodio en los suelos es muy complejo.

Sulfato de potasio. El sulfato de potasio no se acumula en los suelos en grandes cantidades.

Sales del ácido clorhídrico. Cloruros. Los cloruros conjuntamente con los sulfatos son los compuestos más importantes que provocan la formación de los suelos salinos. Todos los cloruros se caracterizan por su alta solubilidad y debido a esto por su toxicidad para las plantas.

Cloruro de calcio. Esta sal existe en los suelos muy raras veces. Esto ocurre debido a que el cloruro de calcio que reacciona con el carbonato y sulfato de sodio, fácilmente pasa a ser sulfato de calcio y carbonato de calcio, precipitándose

de la solución. Por eso la aparición del cloruro de calcio es característico para los suelos, soluciones de los suelos y aguas de lagos salados, solamente en grados máximos de salinización del orden de 400-500 g / l. Es conocido también, la aparición del cloruro de calcio como una sal efímera en los horizontes superiores del suelo, como resultado de las reacciones de intercambio de las soluciones ascendentes del cloruro de sodio con el calcio intercambiable.

Cloruro de magnesio. Esta sal se encuentra con mayor frecuencia en los suelos salinos, aguas freáticas salinas y lagos salinos, en comparación con el cloruro de calcio. Sin embargo, la acumulación de grandes cantidades de cloruro de magnesio ocurre solamente en grados máximos de salinización, y debido a su alta solubilidad (353 g / l); el cloruro de magnesio se caracteriza por su alta toxicidad y ésta es una de las sales muy nocivas para las plantas.

Cloruro de sodio. Conjuntamente con el sulfato de sodio y el sulfato de magnesio es una de las sales de mayor presencia y componente constante en los suelos salinos. La alta solubilidad del cloruro de sodio (264 g / l) condiciona su alta toxicidad para las plantas. Inclusive en contenidos de NaCl alrededor de 0.1 % las plantas se desarrollan anormalmente; muchos suelos salinos contienen 2- 5 % de NaCl.

Cloruro de Potasio. De acuerdo con sus propiedades químicas el cloruro de potasio en general es análogo al cloruro de sodio. Sin embargo, su frecuencia en los suelos no es muy grande, esto se explica por el consumo de potasio por las plantas y organismos y la absorción de éste por las arcillas. En contenidos grandes del cloruro de potasio en los suelos, su toxicidad es muy alta como la del cloruro de sodio.

3.4. CALIDAD DE LAS AGUAS PARA RIEGO.

La calidad de las aguas para riego está determinada por la concentración y la composición de los constituyentes disueltos que ésta contenga (Doneen, 1975). Por lo tanto, la calidad del agua de riego es una consideración de uso agronómico,

y tienen un carácter importante para comprender como se pueden salinizar los suelos agrícolas y como se puede saturar el complejo de intercambio catiónico con sodio intercambiable (Ayers y Wescot, 1987).

En la actualidad, en muchas partes del mundo, así como en las áreas desérticas y semidesérticas de Estados Unidos de América, Asia Central, África, la India, Pakistán, México y otros países, en donde las aguas subterráneas se pueden obtener con relativa facilidad, no siempre tienen la calidad adecuada para uso agrícola. De igual manera, donde se están utilizando aguas superficiales para riego, las calidades de éstas aguas están causando problemas debido a las inadecuadas prácticas de manejo de los cultivos y a los distintos métodos de aplicación de las aguas de riego (Bernstein y Francois, 1973).

Durante la evaluación del uso de una agua de riego en las actividades agrícolas es necesario tomar en cuenta para el ¹⁹ riesgo de: 1. Salinización o bien 2. Incrementar las concentraciones de algunos de los siguientes iones: sulfato de calcio, boro y/o carbonatos (Ayers y Wescot, 1987; Coras, 2000). Es importante señalar que los peligros de altas concentraciones de iones bicarbonatados y carbonatados; se deben analizar con respecto a las concentraciones de los iones de calcio y magnesio (Eaton, 1950).

3.5. PELIGRO DE SALINIZACIÓN DE LOS SUELOS.

El personal de laboratorio de salinidad de los Estados Unidos de Norteamérica (Diagnostic and Rehabilitation of salinity and sodic soils), ha establecido las exigencias para las aguas de riego a fin de prevenir la salinización de los suelos (Richards, 1973). La concentración total de sales solubles en las aguas de riego, para fines de diagnóstico y clasificación se pueden expresar en términos de conductividad eléctrica (CE). Casi todas las aguas para riego que se han usado por mucho tiempo tienen una conductividad eléctrica menor a $2250 \mu\text{S cm}^{-1}$. Ocasionalmente se han usado aguas de mayor conductividad; pero las cosechas que se obtienen no han sido satisfactorias, excepto en muy raras ocasiones.

Con base en la conductividad eléctrica (CE) las aguas para riego se han distribuido en cuatro clases:

Aguas de baja salinidad (C1): La CE es $< 250 \mu\text{S cm}^{-1}$, 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): La CE es $250 - 750 \mu\text{S cm}^{-1}$, 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 las plantas moderadamente tolerantes a las sales.

Aguas altamente salinas (C3): $750 - 2250 \mu\text{S cm}^{-1}$. No pueden usarse en los suelos cuyo drenaje sea deficiente. Aun con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales de control de la salinidad, debiendo por lo tanto seleccionar únicamente aquellas especies vegetales muy tolerantes a las sales.

Aguas muy altamente salinas (C4): Con CE $> 2250 \mu\text{S cm}^{-1}$, 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.

3.6. PELIGRO DE SODIFICACIÓN DE LOS SUELOS.

La clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con los contenidos de sodio en las mismas, se ha hecho con la intención de prever el efecto del ion sodio sobre los sistemas coloidales de los suelos, además de entender los problemas físico-químicos que derivan de tener altas cantidades de sodio intercambiable en los suelos; ya que es conocido que los suelos que tienen altas cantidades de sodio intercambiable poseen un $\text{pH} > 8.4$, alta dispersión de los coloides orgánicos e

inorgánicos y altos contenidos carbonatos y bicarbonatos de sodio (Antipov-Karataev, 1967).

La subdivisión de las aguas de riego con respecto a la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), se basa primordialmente en el efecto que tiene el sodio intercambiable sobre las condiciones físicas de los suelos (Bower *et al.*,

1968). No obstante, las plantas sensibles a este elemento pueden sufrir daños a consecuencia de la acumulación del sodio en sus tejidos cuando los valores de sodio intercambiable son más bajos que los necesarios para afectar las condiciones físicas de los suelos 21

Aguas bajas en sodio (S1): $RAS < 10$. Pueden usarse para el riego en la mayoría de los suelos, con pocas probabilidades de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. No obstante, los cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

Aguas medias en sodio (S2): $RAS = 10 - 18$. En suelos de textura fina el ion sodio representa un peligro considerable, más aún si dichos suelos poseen una alta capacidad de intercambio catiónico, especialmente bajo condiciones de lavado deficiente, a menos que el suelo contenga yeso. Estas aguas solo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad.

Aguas altas en sodio (S3): $RAS = 18 - 26$. Pueden producir niveles altos de sodio intercambiable en la mayoría parte de los suelos, por lo que estos entonces necesitan prácticas especiales de manejo, buen drenaje, fácil lavado e incorporaciones adicionales de materia orgánica. Los suelos yesíferos, pueden no desarrollar niveles perjudiciales de sodio intercambiable, cuando se riegan con este tipo de aguas.

Puede requerirse el uso de mejoradores químicos para sustituir al sodio intercambiable, sin embargo, tales mejoradores no serán económicos si se usan aguas de muy alta sodicidad (Ahmed et al., 1979).

Aguas muy altas en sodio (S4): $RAS > 26$. Esta agua es inadecuada para el riego de cultivos agrícolas, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio del suelo y la aplicación de yeso u otros mejoradores no hace antieconómico el empleo de esta clase de aguas.

Sobre las diferentes concentraciones de sales que contienen las distintas aguas que se utilizan en el riego agrícola y sobre los peligros de sodificación que pueden provocar estas, en general se puede mencionar las aguas cuya conductividad eléctrica es $< 750 \mu\text{S cm}^{-1}$, son satisfactorias en cuanto a concentración de sales, aun cuando los cultivos sensibles pueden ser afectados de manera adversa, cuando se usan aguas cuya conductividad varíe entre 250 y $750 \mu\text{S cm}^{-1}$. Las aguas cuya conductividad eléctrica varía entre 750 y $2250 \mu\text{S cm}^{-1}$ son comúnmente utilizadas, obteniéndose en ellas un crecimiento adecuado de las plantas, siempre y cuando se haga buen manejo de los suelos y se cuente con drenaje eficiente, sin embargo, las condiciones de salinidad se presentarán si el lavado y el drenaje no son adecuados (Richards, 1973; Oster y Rhoades, 1986).

El empleo de aguas con conductividad eléctrica mayor de $2250 \mu\text{S cm}^{-1}$ es una excepción y en pocas veces se tienen buenos resultados en la obtención de buenas cosechas.

Por otra parte se debe mencionar que, el riesgo de sodificación que implica el uso de una agua de riego, queda determinado por las concentraciones absoluta y relativa de los cationes (calcio, magnesio, sodio). Si la proporción de sodio es alta, será mayor el peligro de la sodificación y al contrario, si predomina el calcio y el magnesio, esta sodificación es menor (Bower y Wilcox, 1965).

Adicionalmente se debe mencionar que, los constituyentes inorgánicos solubles en forma iónica de las aguas de riego reaccionan con los suelos, y los principales

cationes son el calcio Ca^{+2} , magnesio Mg^{+2} , sodio Na^{+} y en pequeñas cantidades el potasio K^{+} . Los aniones principales son los carbonatos CO_3^{-2} , bicarbonatos HCO_3^{-} , sulfatos SO_4^{-2} y cloruros Cl^{-} y en menor cantidad los nitratos NO_3^{-} . En el caso particular de las aguas residuales el contenido de nitrato NO_3^{-} y de fosfato PO_4^{-3} es considerable (Castro et al., 1917, Hernández y Durán, 1992). Por último se debe señalar que, la importancia de los constituyentes catiónicos como calcio, magnesio y sodio en agua de riego y su relación con las propiedades físicas y químicas del suelo, se reconoció mucho antes de que las reacciones de intercambio catiónico fueran bien comprendidas (Richards, 1973).

3.7. PROBLEMAS DE INFILTRACIÓN EN LOS SUELOS AGRÍCOLAS BAJO RIEGO.

Un problema de infiltración en los suelos se presenta cuando el agua de riego no atraviesa la superficie del suelo a una velocidad lo suficientemente rápida, como para no permitir que se restituya el agua que se ha consumido por los cultivos agrícolas entre diferentes riegos. La infiltración en la velocidad de paso del agua a través del suelo se debe a las propiedades físicas y químicas de los suelos.

(McNeal, 1968; McNeal *et al.*, 1968). Por lo general, las modificaciones del

medio poroso de los suelos, se deben a diferentes niveles de sodio intercambiable. Es decir, en forma directa, se deben a los altos contenidos de iones de sodio en las soluciones de los suelos y de las aguas de riego. Sobre el efecto de los diferentes tipos de agua en las propiedades físicas de los suelos ya en 1921 Scofield y Headley, en distintos resúmenes de resultados de varios experimentos que se llevaron a cabo para la recuperación de los suelos sódicos, llegaron a la conclusión que “las aguas duras hacen tierras blandas y que las aguas blandas hacen tierras duras” (Richards, 1973). Después de los trabajos de investigación, y a partir de una comprensión profunda de los procesos de intercambio catiónico en los suelos, se ha establecido que cuando los iones de

calcio se encuentran adsorbidos en los suelos en cantidades suficientes, los suelos tienen condiciones favorables para el desarrollo de los cultivos agrícolas (Peterson, 1947). En cambio, cuando en los suelos se tienen en estado adsorbido algunas cantidades de sodio intercambiable, los suelos presentan dispersión coloidal y mayor viscosidad. En estos casos, los suelos poseen baja o muy baja permeabilidad. La Relación de Adsorción de Sodio o RAS de una determinada solución del suelo en equilibrio con el agua de riego, se relaciona con una determinada cantidad de sodio adsorbido en el suelo y en consecuencia, esta relación puede usarse como un “índice” del peligro de sodificación en los suelos que tiene una agua en particular (Ayers y Wescot, 1987; Ortiz, 1977). Esta relación es la siguiente:

$$RAS = \frac{Na}{Ca + Mg} \cdot 100$$

En donde:

Na- es la concentración de los iones de sodio, expresada en mmolc L^{-1} .

Ca- es la concentración de los iones de calcio, expresada en mmolc L^{-1} .

Mg- es la concentración de los iones de magnesio, expresada en mmolc L^{-1} .

24

La tendencia a la precipitación, en las aguas de riego, de los iones de calcio en una primera aproximación puede calcularse, utilizando el índice de saturación de Langelier. Este índice señala que la precipitación del calcio con los iones carbonato y bicarbonato en forma de carbonato de calcio CaCO_3 ; ocurre cuando se alcanza el punto de saturación de los iones de calcio con los iones carbonato y bicarbonato.

El índice de saturación de Langelier está definido por el pH actual del agua menos el pH_c del agua teórico que el agua debería tener en condiciones de equilibrio con el CaCO_3 .

$$\text{Índice de saturación} = \text{pH}_a - \text{pH}_c$$

Los valores positivos de éste índice ($pH_a > pH_c$) indican una tendencia del $CaCO_3$ a precipitarse, mientras que valores negativos ($pH_a < pH_c$) señalan que el agua solubiliza el carbonato de calcio $CaCO_3$, distintos valores del pH_a de las diferentes aguas son obtenidos de los análisis de laboratorio, los valores del pH_c son calculados utilizando la fórmula:

$$pH_c = (pK_2 - pK_c) + pCa + p(Alk)$$

El RAS_{aj} . Se calcula de acuerdo con la ecuación:

$$RAS_{aj} = RAS [1 + (8.4 - pH_c)]$$

En donde:

RAS – es el RAS calculado en la ecuación o sea es el RAS original

pH – 8.4, es el valor de solución del suelo en equilibrio con un suelo sódico.

pH_c – es el pH teórico calculado para el agua de riego.

El pH_c se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

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

En donde:

pK_2 – es el logaritmo negativo de la segunda constante de disociación del ácido carbónico H_2CO_3 corregida por la fuerza iónica de la solución.

pK_c – es el logaritmo negativo de la constante de solubilidad del $CaCO_3$ corregida por la fuerza iónica de la solución.

$p(Ca)$ - es el logaritmo negativo de la concentración molar del Ca.

$p(Alk)$ es el logaritmo negativo de la concentración equivalente titulable de ($CO_3^{2-} + HCO_3^-$).

El RAS° corregido se calcula de acuerdo con la ecuación:

$$RAS^\circ = NaCa^\circ + Mg2$$

26

En donde:

Na – es la concentración de los iones de sodio en el agua de riego expresada en $mmol_c^{-1}$.

Ca° - es la concentración corregida de los iones de calcio en el agua de riego, expresada en $mmol_c^{-1}$.

Mg – es la concentración de los iones de magnesio en el agua de riego, expresada en $mmol_c^{-1}$.

El valor del Ca° es el contenido de los iones calcio en el agua de riego, corregido por la salinidad del agua (CE), y por el contenido de iones bicarbonato en su relación con los iones de calcio (HCO_3^- / Ca^{+2}) y por la presión parcial del bióxido de carbono CO_2 , ejercida en los primeros milímetros del suelo ($P = 0.0007$ atmósferas).

El fundamento teórico del índice Relación de Adsorción de Sodio o RAS y sus correlaciones se indican en (Ayers y Wescot, 1987; Bower y Wilcox, 1965; Bower *et. al.*, 1965. Suárez 1981; Velázquez, *et. al.*, 2002).

En el cuadro 2; se presenta en forma tabulada el procedimiento para calcular el pH teórico calculado de las aguas para riego.

Cuadro 2. Procedimiento para calcular el pH_c teórico calculado de las aguas de riego ¹.

$pH_c = (pK_2 - pK_c) + pCa + p(Alk)^2$				
Concentración mmolc L ⁻¹	$pK_2 - pK_c$	pCa	p(Alk)	
0.05	2.00	4.60	4.30	
0.10	2.00	4.30	4.00	
0.15	2.00	4.10	3.80	
0.20	2.00	4.00	3.70	
0.25	2.00	3.90	3.60	
0.30	2.00	3.80	3.50	
0.40	2.00	3.70	3.40	
0.50	2.10	3.60	3.30	
0.75	2.10	3.40	3.10	
1.00	2.10	3.30	3.00	
1.25	2.10	3.20	2.90	
1.50	2.10	3.10	2.80	
2.00	2.20	3.00	2.70	
2.50	2.20	2.90	2.60	
3.00	2.20	2.80	2.50	
4.00	2.20	2.70	2.40	
5.00	2.20	2.60	2.30	
6.00	2.20	2.50	2.20	
8.00	2.30	2.40	2.10	
10.00	2.30	2.30	2.00	
12.50	2.30	2.20	1.90	
15.00	2.30	2.10	1.80	
20.00	2.40	2.00	1.70	
30.00	2.40	1.80	1.50	
50.00	2.50	1.60	1.30	
80.00	2.50	1.40	1.10	

1. Ayers y Westcot 1987. La calidad del agua en la agricultura. FAO, ROMA, ITALIA.
2. El pH_c es el pH teórico calculado por el agua de riego.
3. Entrando en la primera columna con las concentraciones, en mmolc L⁻¹, a) Ca+Mg+Na, b) Ca y c) CO₃ + HCO₃ se obtienen los valores de (pK₂ - pK_c), pCa y p(Alk) respectivamente.

En cuadro 3; se presenta en forma tabulada el procedimiento para calcular el contenido de calcio corregido Ca° .

En la agricultura bajo riego se ha utilizado una gran variedad de aguas de diferente origen como: manantiales, lagunas y lagos, superficiales de ríos y de yacimientos acuíferos. Los métodos de riego, o sea la forma en que se aplica el agua de riego de diversas fuentes han variado con el tiempo. Por ejemplo hoy en día, como la calidad del agua disponible de los yacimientos acuíferos ha disminuido se han difundido en forma preponderante los riegos presurizados (riego por goteo y aspersión), por eso conocer la calidad del agua de riego adquiere una importancia fundamental. Las láminas del agua de riego durante el uso de métodos presurizados son pequeñas pero frecuentes. En el caso de la aplicación del riego mediante métodos presurizados los valores que eventualmente adquiere la Relación de Adsorción de Sodio son de sustancial importancia, ya que si los valores son altos, en los suelos se presentarán problemas de infiltración debido a los procesos de dispersión coloidal, provocados por el ión sodio que se encuentra en exceso en las aguas de riego (Thomas y Bruno, 1968; Oster y Shroer, 1979).

Por lo que se refiere a los riegos por gravedad, el uso excesivo de grandes láminas de riego provoca la salinización y sodificación de los suelos (Peña, 1979).

Debido a los grandes problemas que se tienen en el manejo de los suelos agrícolas bajo riego, últimamente, se ha puesto una mayor atención a la calidad del agua para riego.

En el cuadro 4; se presentan las directrices para valorar la calidad del agua de riego dentro de las perspectivas de manejo de los suelos agrícolas.

3.8. EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES BICARBONATOS HCO_3^- Y CARBONATO CO_3^{2-} EN LA CALIDAD DE LAS AGUAS PARA RIEGO.

Cuadro 3. Concentración de calcio (Ca^{2+}) en el agua del suelo, contenido en el suelo cerca de la superficie ²⁹ ltarías de regar con aguas de determinado valor HCO_3^-/Ca^{2+} actividad eléctrica del agua de riego (CEa).1,2,3

		SALINIDAD DEL AGUA APLICADA CE mS cm ⁻¹											
		0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0
	0.05	13.20	13.61	13.92	14.40	14.79	15.26	15.91	16.43	17.28	17.97	19.07	19.94
	0.10	8.30	8.57	8.77	9.07	9.31	9.62	10.02	10.35	10.89	11.32	12.01	12.56
	0.15	6.34	6.54	6.69	6.92	7.11	7.34	7.65	7.90	8.31	8.64	9.17	9.58
	0.20	5.24	5.40	5.52	5.71	5.87	6.06	6.31	6.52	6.86	7.13	9.57	7.91
	0.25	4.51	4.65	4.76	4.92	5.06	5.22	5.44	5.62	5.91	6.15	6.52	6.82
	0.30	4.00	4.12	4.21	4.36	4.48	4.62	4.82	4.98	5.24	5.40	5.77	6.04
	0.35	3.61	3.72	3.80	3.94	4.04	4.17	4.35	4.49	4.72	4.91	5.21	5.45
	0.40	3.30	3.40	3.48	3.60	3.70	3.82	3.98	4.11	4.32	4.49	4.77	4.98
	0.45	3.05	3.14	3.22	3.33	3.42	3.53	3.68	3.80	4.00	4.15	4.41	4.61
	0.50	2.84	2.93	3.00	3.10	3.19	3.29	3.43	3.54	3.72	3.87	4.11	4.30
	0.75	2.17	2.24	2.29	2.37	2.43	2.51	2.62	2.70	2.84	2.95	3.14	3.28
	1.00	1.79	1.85	1.89	1.96	2.01	2.09	2.16	2.23	2.35	2.44	2.59	2.71
Valor de	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
HCO_3^-/Ca^{2+}	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	1.67	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
	4.44	0.71	0.73	0.75	0.78	0.80	0.82	0.86	0.88	0.93	0.97	1.03	1.07
	4.50	0.66	0.68	0.69	0.72	0.74	0.76	0.79	0.82	0.86	0.90	0.95	0.99
	5.00	0.61	0.63	0.65	0.67	0.69	0.71	0.74	0.76	0.80	0.83	0.88	0.93
	7.00	0.49	0.50	0.52	0.53	0.55	0.57	0.59	0.61	0.64	0.67	0.71	0.74
	10.00	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43	0.45	0.47	0.48	0.51	0.53	0.56	0.58
	20.00	0.24	0.25	0.26	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.32	0.33	0.35	0.37
	30.00	0.18	0.19	0.20	0.20	0.21	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.27	0.28

1. Suárez, 1981

2. Supone: a) una fuente de calcio proveniente de silicatos o caliza ($CaCO_3$); b) no existe precipitación del magnesio; y c) la presión relativa del CO_2 cerca de la superficie del suelo es de 0.0007 atmósferas

3. $Ca^{2+}, HCO_3^-/Ca^{2+}$ están expresados en $mmol\ l^{-1}$ y la CEa en $mS\ cm^{-1}$.

Cuadro 4. Directrices para interpretar la calidad de las aguas de riego.

Problema Potencial	Unidades	Grado de restricción de uso		
		Ninguna	Ligera	Severo
Salinidad (afecta disponibilidad de agua para el cultivo)				
ECa	dS m ⁻¹	< 0.7	0.7-3.0	> 3.0
TSS	mg L ⁻¹	< 450	450-2000	> 2000
Infiltración (reduce infiltración; evaluar usando a la vez la ECa y el RAS)³				
RAS = 0-3 Y ECa =	=	> 0.7	0.7-0.2	< 0.2
= 3-6	=	> 1.2	1.2-0.3	< 0.3
= 6-12	=	> 1.9	1.9-0.5	< 0.5
= 12-20	=	> 2.9	2.9-1.3	< 1.3
= 20-40	=	> 5.0	5.0-2.9	< 2.9
Toxicidad de Iones Específicos (afecta cultivos sensibles)				
Sodio (Na)*				
riego por superficie	RAS	< 3	3.0-9.0	> 9
riego por aspersión	mmol c L ⁻¹	< 3	> 3	
cloro (Cl)*				
riego por superficie	mmol c L ⁻¹	< 4	4.0-10.0	> 10
riego por aspersión	mmol c L ⁻¹	< 3	> 3	
Boro (B)	mg L ⁻¹	< 0.7	0.7-3.0	> 2.5
Oligoelementos				
Varios (afecta cultivos sensibles)				
Bicarbonato (HCO₃)				
(aspersión foliar únicamente)	mmol c L ⁻¹	< 1.5	1.5-8.5	> 8.5
pH		Amplitud Normal: 6.5 - 8.4		

1. Fuente: University of California Committee of Consultants 1974.

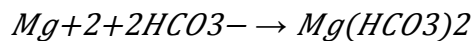
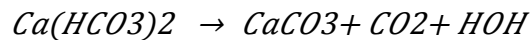
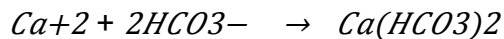
2. ECa es la conductividad eléctrica del agua; medida de la salinidad, expresada en decisiémenes por metro a 25°C (dS m⁻¹) en mmhos por centímetro a 25°C (mmhos cm⁻¹). Las dos medidas son equivalentes. TSS, es el total de sólidos en solución expresado en miligramos por litro (mg L⁻¹).

3. RAS es la relación de adsorción de sodio, algunas veces representada como RNA. La velocidad de infiltración aumenta a medida que aumenta la salinidad. Evalúese el problema potencial de infiltración utilizando el RAS y la ECa. Fuentes: Rhoades 1977 y Oster y Schroer 1979.

4. La mayoría de los cultivos arbóreos y plantas leñosas son sensibles al sodio y al cloro; en el caso de riego por superficie úsese los valores indicados. La mayor parte de los cultivos anuales no son sensibles. En el caso de riego por aspersión sobre el follaje y humedad relativa por debajo del 30% el sodio y el cloro pueden ser absorbidos por las hojas de cultivos sensibles.

Por lo general, las aguas para riego ricas en iones bicarbonato son las que vienen de yacimientos acuíferos de basaltos, así como también las de zonas urbano-industriales y por último, aguas subterráneas en las que se tienen procesos reductores de mucha intensidad (Antipov – Karataev, 1967). Históricamente, mucho antes de que se estableciera la importancia de la determinación de los valores de la Relación de Adsorción de Sodio, ya se conocían las consecuencias que se tienen en los suelos cuando éstos se regaban con agua de riego que tenía grandes concentraciones de iones bicarbonato (Eaton, 1950).

En las aguas para riego ricas en iones bicarbonato, existe la tendencia de los iones calcio y magnesio a precipitarse en forma de carbonatos, a medida que la solución del suelo se vuelve más concentrada. La precipitación de los iones de calcio y de magnesio tiene ocurrencia de acuerdo con las siguientes ecuaciones:



Estas reacciones no se completan totalmente en circunstancias ordinarias, pero a medida que vayan teniendo lugar, las concentraciones de calcio y de magnesio se van reduciendo, aumentando de esta manera la proporción relativa de iones de sodio en las aguas para riego. Eaton (1950), en su tiempo, propuso los siguientes parámetros de evaluación de las aguas de riego en iones bicarbonato (Richards, 1973).

$$1. \text{ Porcentaje de Sodio encontrado} = \frac{Na}{Ca^{+2} + Mg^{+2} + Na} \cdot 100$$

$$2. \text{ Porcentaje de Sodio posible} = \frac{Na}{Ca^{+2} + Mg^{+2} + Na} - \frac{(CO_3^{2-} + HCO_3^-)}{Ca^{+2} + Mg^{+2} + Na}$$

$$3. \text{ Carbonato de sodio residual } (Na_2CO_3) = (CO_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{+2} + Mg^{+2})$$

En estas relaciones, los constituyentes iónicos se expresan en $\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$. El cálculo de los valores de estas ecuaciones incluye la presuposición de que los iones CO_3^{2-} y HCO_3^- son cuantitativamente precipitados en los suelos hasta el límite de las concentraciones presentes del calcio Ca^{+2} y del magnesio Mg^{+2} en las aguas de riego.

Con base en los índices de Eaton (1950) y usando el término “carbonato de sodio residual”, se puede concluir que las aguas con más de $2.5 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ de “carbonato de sodio residual” no son buenas para riego. Aguas que contienen de 1.25 a $2.5 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ son dudosas y las aguas para riego que contienen menos de $1.25 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ con toda seguridad son buenas.

Se considera que, utilizando buenas prácticas de manejo de cultivos y que conjuntamente con la aplicación de mejoradores químicos, con éxito podría permitirse el uso de las aguas dudosas para riego de cultivos (Ahmed et al., 1979; Oster y Rhoades, 1986).

En éste trabajo se consideró clasificar las aguas del cauce general RíoTula-Río Moctezuma-Río Claro, de acuerdo con los índices de (CSR, SE y SP.).

Por último también se debe advertir que, al clasificar las aguas para riego se supone que éstas se van a usar bajo condiciones medias, con respecto a la textura del suelo, la velocidad de infiltración, la cantidad de la lámina de riego que se va a utilizar, el clima, y la tolerancia de los cultivos a las condiciones salinas de los suelos. Desviaciones considerables del valor medio de cualesquiera de estas variables, puede hacer inseguro el uso de una determinada agua de riego, que bajo condiciones medias sería de buena calidad o, al contrario, estas desviaciones de los valores medios pueden inducir a considerar una agua de riego específica como buena, cuando, bajo condiciones medias sería de dudosa calidad.

3.9. ÍNDICE DE SALINIDAD EFECTIVA (S.E.).

Este índice de clasificación de las aguas para riego, cuadro 5, estima el peligro que pueden producir las sales más solubles a al formar parte de la solución

del suelo, es decir que al sustraerse de la concentración total, los carbonatos de calcio y de magnesio y los sulfatos de calcio; cuando estos se precipitan en el momento en que el agua de riego pasa a formar parte de la solución del suelo y dejan de participar en el ascenso de la presión osmótica de la solución del suelo.

La salinidad efectiva se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Si } Ca > (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$$

Entonces:

$$SE = \text{suma de cationes} - (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$$

$$\text{Si } Ca < (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-}); \text{ pero } Ca > CO_3^{2-} + HCO_3^-$$

Entonces:

$$SE = \text{suma de cationes} - Ca$$

$$\text{Si } Ca < (CO_3^{2-} + HCO_3^-) \text{ pero } (Ca^{2+} + Mg^{2+}) > (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$$

Entonces:

$$SE = \text{suma de cationes} - (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$$

$$\text{Si } (Ca^{2+} + Mg^{2+}) < (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$$

Entonces:

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

En donde todos los iones se expresan en $\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$. Aquí se puede observar que, al analizar las ecuaciones, siempre a la suma de cationes se le resta el comportamiento de las sales que pueden precipitarse y que por lo tanto se encuentran en menor cantidad.

Las diferentes aguas de riego, de acuerdo con el índice de salinidad efectiva se clasifican como sigue:

Clase	Salinidad efectiva en mmolc • L ⁻¹ .		
Buena	<	3	
Condicionada	3	a	15
No recomendable	>	15	

3.10. ÍNDICE DE SALINIDAD POTENCIAL (SP).

Este índice determina la cantidad del Cl⁻¹ y SO₄-2 que puede ser perjudicial a los cultivos debido al incremento de la presión osmótica de la solución del suelo.

Los cloruros y los sulfatos son sales que se quedan en la solución del suelo, cuando la humedad aprovechable para las plantas es < 50 %.

La fórmula para determinar la salinidad potencial es la siguiente:

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

Las concentraciones sodio de estos iones se expresan en mmolc • L⁻¹.

Cuadro 6. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo con el “índice” de salinidad potencial

Clase	Salinidad potencial en mmolc • L ⁻¹ .		
Buena	<	3	
Condicionada	3	a	15
No recomendable	>	15	

De acuerdo con lo que se ha expuesto en esta revisión bibliográfica, sobre el origen de las sales solubles ³⁵ as naturales y para riego, y en correspondencia con determinados procesos físico-químicos de precipitación, los

contenidos de los iones bicarbonatos y carbonatos de calcio sufren variaciones considerables, afectándose de esta manera la Relación de Adsorción de Sodio; en este trabajo, en la presentación de discusión de los resultados analíticos de las muestras de agua del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro obtenidas en estaciones de muestreo, se establece mediante el uso de diferentes índices de clasificación, como pueden mejorarse las aguas superficiales del Río Tula, las aguas mezcladas del Río Tula con las aguas residuales del Valle del Mezquital y las aguas del Río Moctezuma en su afluencia con las aguas del Río Claro en sus propiedades físico-químicas y como pueden hacerse recomendaciones adicionales para su uso en la agricultura.

Adicionalmente aquí en este estudio se determinaron los contenidos de PO_4-3 y de boro B. El cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro conduce en una medida, en menor o mayor grado, aguas residuales mezcladas con aguas naturales, es entonces importante conocer en que medida éstas aguas contienen fosfatos como fuentes de nutrientes para distintos cultivos y a su vez también conocer los contenidos de boro B como un elemento que es toxico para los cultivos agrícolas.

El conocimiento de la calidad del agua para riego, a través de una clasificación mediante diferentes índices, nos permite hacer predicciones sobre el efecto de las composiciones químicas de las aguas sobre los suelos agrícolas bajo riego.

El cauce general Río Tula–Río Moctezuma–Río Claro conduce aguas de escurrimiento superficial y aguas mezcladas por lo que las variaciones en las composiciones químicas de las aguas de éste cauce general deben ser consideradas.

OBJETIVO GENERAL

Clasificar de acuerdo con su calidad agronómica las aguas naturales y mezcladas del cauce general Río Tula–Río Moctezuma–Río Claro de acuerdo con las composiciones iónicas, el fósforo y el boro.

OBJETIVOS PARTICULARES

Realizar un muestreo simple por duplicado de 82 estaciones de muestreo a lo largo de la red de drenaje del cauce general Río Tula–Río Moctezuma–Río Claro.

Determinar los parámetros físicos y químicos de las aguas residuales (pH, conductividad eléctrica, residuo seco evaporado, carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, sodio, potasio, calcio, magnesio, boro y fósforo).

Determinar los índices salinos: Relación de Adsorción de sodio (RAS), Salinidad efectiva (SE), Salinidad potencial (SP), Carbonato de sodio residual (CSR).

IV. MATE 37 ' METODOS

4.1 DESCRIPCION GEOGRAFICA DE LA ZONA EN ESTUDIO.

El tramo del Río Tula–Río Moctezuma–Río Claro está constituido por cadenas montañosas, lomeríos y llanuras, aunque también hay algunos valles, montes y cañones. El embalse Taximhay recoge las aguas naturales de escurrimientos de la zona de Villa del Carbón que van a formar el Río Tula. En el tramo del Río Tula entre Tepéji del Río e Ixmiquilpan se recogen aguas mezcladas. En éste tramo geográfico se encuentra el Valle del Mezquital. En las llanuras intermontanas del Valle del Mezquital, aunque se tiene escasa precipitación, el desarrollo de la agricultura ha tenido éxito debido al uso de aguas residuales que derivan de la ciudad de México.

Actualmente proceden de la ciudad de México aproximadamente 2200 millones de $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$ de aguas residuales. Estos grandes volúmenes de agua atraviesan la denominada zona agrícola del Valle del Mezquital, que en realidad es un sistema de riego de valles intermontanos.

En el Valle del Mezquital predomina un clima semiseco-templado con lluvias en verano. La temperatura media anual es de 14.8° , ocurre la máxima en mayo con 17.3°C . La precipitación total anual es de 543.4 mm, con la máxima incidencia en septiembre con 117.4 mm y la mínima incidencia de precipitación en enero con 8.8 mm (INEGI, 1992).

Los valles intermontanos que se riegan con aguas mezcladas, se encuentran casi en su totalidad en la provincia geológica del eje Neovolcánico y muy parcialmente en la provincia geológica de la Sierra Madre Oriental.

En las estructuras volcánicas de la provincia del Eje Neovolcánico, el agua actúa como agente de intemperismo físico-químico y por lo tanto de disolución, aprovechando en su circulación un sistema de fracturas, propiciándose con esto el desarrollo de suelos residuales. Es decir, el agua altera las rocas volcánicas. En cambio, en la zona de calizas, en el tramo del Río Moctézuma y del Río Claro el agua aprovecha para su circulación, todo el sistema de fracturas y forma en los depósitos de calizas un con 38 estructuras típicas de regiones cársticas,

como son cavernas y simas. También el agua Residual solubiliza las calizas de ésta zona.

En general, en las formaciones estratigráficas de la provincia del Eje Neovolcánico, es en donde se encuentra mayoritariamente el Valle del Mezquital. Las rocas ígneas extrusivas se presentan en forma de basalto, tobas y brechas volcánicas. Por ejemplo, los basaltos extrusivos afloran en Xochitlán y Mixquiahuala (INEGI, 1992).

En la parte del valle del Mezquital que pertenece parcialmente a la provincia geológica Sierra Madre Oriental se tienen rocas sedimentarias, conglomerados y lutita-arenisca.

En los alrededores de Ixmiquilpan se tienen rocas sedimentarias del tipo arenisca-conglomerado. Esta formación se presenta morfológicamente como mesas y lomeríos de bajo relieve.

En la región del Cubo, al norte de Ixmiquilpan, se tienen rocas de limolita-arenisca. Esta es una unidad sedimentaria de origen continental lacustre.

En general, las calizas son de origen marino. Las lutitas son unidades sedimentarias de origen continental y en algunas ocasiones presentan intercalaciones de areniscas y tobas. Las aguas superficiales del Estado de Hidalgo como el cauce general Río Tula–Río Moctezuma–Río Claro se encuentran comprendidas casi en su totalidad dentro de la región hidrológica de Río Pánuco (INEGI, 1992).

La toma de muestras se efectuó en 82 estaciones de muestreo (figura 1), distribuidos a lo largo del cauce general Río Tula–Río Moctezuma–Río Claro. El muestreo fue siempre con dos repeticiones en la superficie del agua, dando un total de 82 muestras, de acuerdo a la NOM-AA-03-1980.

Las determinaciones químicas que se llevaron a cabo en las aguas residuales de esta red hidrográfica fueron: pH, CE, Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} , K^{+} , CO_3^{-2} , HCO_3^{-} , Cl^{-} , SO_4^{-2} , RSE o TSS cuadro 7 .

Cuadro 7. Métodos analíticos utilizados para caracterizar las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro. Estados de Hidalgo y San Luis Potosí, México.

Parámetro	Método	Referencia
1. pH	Potenciómetro, marca Beckman	NOM-AA-08-1980
2. Conductividad Eléctrica	Conductímetro puente de Wheatstone	NOM-AA-93-1984
3. Residuo seco evaporado o total de sólidos solubles	Gravimetría utilizando estufa Hot-Plate modelo Type 2200 Thermoline	NOM-AA-34-1981
4. Residuo seco calcinado	Gravimetría utilizando mufla Lindberg	NOM-AA-34-1981
5. Sodio y potasio	Flamometría con un flamómetro 648 IL $\lambda=589\text{nm}$ utilizando soluciones estándar 140 meq L ⁻¹ para Na y 5.0 meq L ⁻¹ para K	APHA, 1989 3500-n Y K, D
6. Calcio	Volumetría titulación con EDTA (Merck, Titrisol, Art.9992). 0.01N	APHA, 1989 3500 Ca D
7. Carbonatos	Volumetría titulación con ácido sulfúrico (Merck, Titrisol Art. 9984) 0.01N, indicador fenoftaleína	APHA, 1989 2320 B
8. Bicarbonatos	Volumetría titulación con ácido sulfúrico (Merck, Titrisol Art.9984) 0.01N	APHA, 1989 2320 B
9. Cloruros	Volumetría Mohr. Titulación con Nitrato de plata (Merck, Nitrato de plata en solución, Art, OC248386)0.01N indicador cromato de potasio al 5 %	APHA, 1989 4500-C IB
10. Sulfatos	Turbidimetría Espectrofotómetro 35 Perkin Elmer $\lambda=420\text{ nm}$	APHA, 1989 4500-SO4 E
11. Calcio más Magnesio	Volumetría titulación con EDTA (Merck, Titrisol, Art.9992) 0.01N	APHA, 1989 3500 Ca D
12. Boro	Espectrofotometría 35 Perkin-Elmer $\lambda=650\text{ nm}$	R. KREN SSSA BOOK SERIES: 5
13. Fosfatos	Espectrofotometría $\lambda=690\text{ nm}$	SHIO KUO SSSA BOOK SERIES:5

Para evaluar los problemas de los efectos de las variaciones de los iones divalentes y de los iones monovalentes que conducen el cauce general Río Tula–Río Moctezuma–Río Claro sobre las propiedades físico-químicas de los suelos que riegan, sobre todo, en lo que concierne a los procesos de coagulación y dispersión coloidal, se determinó como varía la Relación de Adsorción de Sodio $NaCa+Mg2$ (RAS) con diferentes enfoques de corrección.

Adicionalmente, en éstas aguas residuales se evaluó el contenido de ortofosfatos $PO4-3$ y de Boro. Los ortofosfatos se determinaron con el fin de conocer que cantidades se descargan en los suelos del Valle del Mezquital de manera aproximada en el riego con aguas residuales mezcladas y evaluar su contribución a la fertilidad del suelo. Por otro lado, como el Boro, en cantidades superiores a 1-2 mg L⁻¹, es tóxico para las plantas, a fin de evaluar el riesgo de toxicidad, se determinó su contenido en las aguas mezcladas. Para establecer la localización geográfica de los sitios de muestreo, o llamados así estaciones de muestreo, se utilizó un geoposicionador digital del tipo Megellan modelo MAP 330.

El porcentaje de error en las determinaciones analíticas se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\%Diferencia = \frac{\sum meq L^{-1} cationes - \sum meq L^{-1} aniones}{\sum meq L^{-1} cationes + \sum meq L^{-1} aniones} \cdot 100$$

En general, siempre se debe tomar en cuenta, que las soluciones salinas son electroneutrales, sin embargo, como los cationes y los aniones de las sales son predominantemente más solubles, y además sus variaciones en concentración son pequeñas, en comparación con las concentraciones de otros iones nutricionales como lo son los nitratos $NO3-$ y los fosfatos $PO4-3$; por lo tanto las

diferencias de determinación analítica de los iones de las sales solubles deben ser pequeños. Los iones NO_3^- y PO_4^{3-} son fuertemente afectados en su concentración por procesos biológicos.

Las soluciones salinas, en términos rigurosos son electroneutrales y por lo tanto en el caso de la determinación de los cationes y de los aniones, la suma de cationes debe ser aproximadamente igual a la suma de los aniones, sin embargo, se ha establecido en la literatura valores permisibles de diferencia en las determinaciones analíticas (APHA, 1989).

En el cuadro 8. Se presentan los porcentajes de diferencia aceptable para las diferentes determinaciones analíticas.

SUMA DE CATIONES meq L ⁻¹	% DE DIFERENCIA ACEPTABLE
0.0 - 3.0	± 0.2
3.0 - 10.0	± 2.0
20 - 800.0	± 2.5

Otra forma en que se evaluó la exactitud de los resultados fue a través de la relación $mmol_c \cdot L^{-1}$ con la conductividad eléctrica, de acuerdo con la siguiente ecuación: $mmol_c L^{-1} = 10.0 CE$.

donde :

$mmol_c L^{-1}$ – Son los $mmol_c L^{-1}$ de los cationes o de los aniones en las soluciones salinas.

CE – Es la conductividad eléctrica de las soluciones salinas expresada en $mS cm^{-1}$.

La discusión sobre los contenidos de los distintos iones en las soluciones de las aguas residuales y mezcladas se llevará a cabo mediante el análisis, para los dos muestreos: Muestreo 1 primavera 2006 y muestreo 2 otoño 2007; de los parámetros siguientes: 1. Distribución de los cationes y aniones en la red hidrográfica del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro; 2. Concentración total de sales en las muestras de agua mg L^{-1} ; 3. Conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$; 4. Distribución de los cationes y aniones en la red hidrográfica; 5. La dependencia de la presión osmótica (MPa) con respecto a la conductividad eléctrica mS cm^{-1} ; 6. Valores de la relación de adsorción de sodio en sus diferentes formas de expresión RASor , RASaj , RAS° ; 7. Problemas de infiltración de estas aguas mediante el establecimiento de la relación RAS-CE; 8. Clasificación de las aguas residuales y mezcladas utilizando los índices de salinidad efectiva SE, salinidad potencial SP y Carbonato de Sodio Residual CSR; 9. Distribución de fosfatos P04-3 y del Boro B en la red Hidrográfica.

5.1 ESTACIONES DE MUESTREO Y COMPOSICIÓN IÓNICA.

5.1.1 MUESTREO 1 PRIMAVERA 2006.

En el cuadro 9; se presentan las fechas de las diferentes estaciones de muestreo y las coordenadas de su localización, así como las diferentes altitudes en que se encuentran las estaciones de muestreo 1. En éste cuadro se puede observar que los escurrimientos que se embalsan en la presa Taximhay se encuentran a una altitud de 2250 msnm; y que la estación de muestreo de más baja altitud corresponde al Río Amajac en las cercanías de Tamazunchale, S.L.P.

En el cuadro 10; en el que se indican las composiciones iónicas de las distintas muestras de 35 estaciones de muestreo se puede observar que los valores de la conductividad eléctrica CE en $\mu\text{S cm}^{-1}$ varía de 41-128-551-1409 $\mu\text{S cm}^{-1}$. El valor más bajo que es el de 41 $\mu\text{S cm}^{-1}$ corresponde a la estación de muestreo el

chorrito. Esta muestra de agua es prácticamente agua de lluvia. Las aguas de la muestra 7 que corresponde a las aguas de la Presa Taximhay tienen un valor de

Cuadro. 9 Localización geográfica de las estaciones de muestreo el cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro. Estados de Hidalgo y San Luis Potosí. México Muestreo 1. Primavera 2006.

No.	IDENTIFICACION	Fecha colecta	Coordenadas		msnm
			N	W	
1	RIO BUENAVENTURA	25 – septiembre - 06	19°30' 15''	99°15' 5''	2175
2	RIO TEPEJI	25 – septiembre - 06	19°18' 20''	99°20' 18''	2150
3	RIO TEPEJI AFLUENCIA CON EL RÍO BUENAVENTURA	25 – septiembre - 06	19°15' 30''	99°15' 06''	2123
4	SANTA MARIA QUELITES (BALNEARIO SAN VICENTE)	25 – septiembre - 06	19°15' 45''	99°15' 07''	2248
5	EL CHORRITO	25 – septiembre - 06	19°48' 15''	99°22' 06''	2100
6	PUENTE GOLONDRINAS	25 – septiembre - 06	19°46' 20''	99°25' 08''	2150
7	TAXIMHAY	25 – septiembre - 06	19°48' 25''	99°28' 18''	2250
8	PRESA LA REQUENA	25 – septiembre - 06	19°49' 36''	99°18' 40''	2150
9	RIO TULA (PUENTE CRUZ AZUL)	26 – septiembre - 06	20°09' 40''	99°19' 38''	2029
10	RIO TULA (SAN MARCOS)	26 – septiembre - 06	20°10' 08''	99°19' 58''	2016
11	PUENTE METLAC	26 – septiembre - 06	20°12' 19''	99°20' 05''	2020
12	PRESA ENDHÓ	26 – septiembre - 06	20°15' 27''	99°22' 09''	2005
13	PRESA ROJO GOMEZ	26 – septiembre - 06	20°26' 57''	99°17' 25''	1986
14	PRESA VICENTE AGUIRRE	26 – septiembre - 06	20°28' 18'	99°26' 18''	1859
15	RÍO TULA (IXMIQUILPAN)	26 – septiembre - 06	20°29' 10''	99°14' 47''	1691
16	RÍO TULA (TLACOTLAPILCO)	26 – septiembre - 06	20°22' 18''	99°12' 30''	1600
17	TLACOTLAPILCO	27 – septiembre - 06	20°22' 32''	99°12' 36''	1602
18	RÍO TULA (CHILCUAUTLA)	27 – septiembre - 06	20°19' 46''	99°12' 42''	1940
19	RÍO TULA (PROGRESO)	27 – septiembre - 06	20°25' 37''	99°14' 38''	1884
20	BALNEARIO PROGRESO	27 – septiembre - 06	20°25' 40''	99°14' 39''	1880
21	ARROYO EL TEPHÉ	27 – septiembre - 06	20°28' 40''	99°12' 56''	1763
22	PRESA DEBODHÉ	27 – septiembre - 06	20°29' 18''	99°10' 13''	2000
23	TZINDEJE (BALNEARIO)	28 – septiembre - 06	20°32' 26''	99°16' 32''	1825
24	DOXEY (BALNEARIO)	28 – septiembre - 06	20°31' 08''	99°16' 08''	1730
25	TZINDEJE (BALNEARIO)	28 – septiembre - 06	20°31' 10''	99°14' 32''	1822
26	PUENTE TASQUILLO	28 – septiembre - 06	20°31' 18'	99°17' 02''	1708
27	PRESA ZIMAPAN	28 – septiembre - 06	20°38' 10''	99°29' 42''	1975
28	RIO VEGA LARGA (MOCTEZUMA , SAN LUIS POTOSI)	29 – septiembre - 06	21°14' 09''	98°52' 07''	190
29	NACIMIENTO RANCHO QUEMADO	29 – septiembre - 06	21°14' 15''	98°45' 33''	200
30	RIO AMAJAC	29 – septiembre - 06	21°14' 01''	98°45' 12''	140
31	RIO CLARO (AFLUENCIA CON EL RÍO AMAJAC)	29 – septiembre - 06	21°14' 26''	98°45' 11''	190
32	RIO MOCTEZUMA (TERMOELECTRICA)	29 – septiembre - 06	21°15' 00''	98°45' 25''	198
33	RIO CHAPULHUACANCITO	29 – septiembre - 06	21°09' 28''	98°54' 25''	153
34	RIO HUITZILINGO (ORIZATLÁN)	29 – septiembre - 06	21°10' 24''	98°39' 26''	220
35	MOLANGO	29 – septiembre - 06	20°47' 2''	98°43' 34''	1575

Cuadro. 10 .Composición iónica en las aguas que circulan en el cauce general Río-Tula-Río Moctezuma-Río Claro. Estados de Hidalgo y San Luis Potosí. México. Muestreo 1. Primavera 2006.

No	pH	CE ($\mu\text{mhos-cm}^{-1}$)	mmole L ⁻¹										R.S.E mg L ⁻¹	% Error	PRESION OSMOTICA MPa
			Ca	Mg	Na	K	suma	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	suma			
1	7.30	705	2.31	2.60	1.85	0.23	6.99	0.00	5.21	1.40	0.24	6.85	518.56	1.01	0.027
			46.29	31.59	42.55	8.99			317.81	49.63	11.53				
2	7.20	128	1.16	1.30	1.85	0.23			5.21	1.40	0.12		90.48	1.20	0.005
			0.30	0.40	0.47	0.09	1.26	0.00	0.73	0.40	0.10	1.23			
3	7.05	128	6.01	4.86	10.81	3.52			44.53	14.18	4.80		89.99	1.82	0.005
			0.15	0.20	0.47	0.09		0.00	0.73	0.40	0.05				
4	6.90	743	0.28	0.40	0.49	0.05	1.22	0.00	0.76	0.40	0.10	1.26	581.98	1.24	0.030
			5.61	4.86	11.27	1.15			46.36	14.18	4.80				
5	7.15	41	0.14	0.20	0.49	0.05			0.76	0.40	0.05		288.66	1.12	0.016
			1.70	2.15	3.25	0.25	7.35	0.00	6.67	0.40	0.10	7.17			
6	7.30	275	34.07	26.12	74.75	9.78			406.87	14.18	4.80		186.47	1.17	0.011
			0.85	1.08	3.25	0.25		0.00	6.67	0.40	0.05				
7	7.50	128	1.10	1.60	1.20	0.16	4.06	0.00	2.57	1.30	0.10	3.97	88.44	1.20	0.005
			22.04	19.44	27.60	6.26			156.77	46.09	4.80				
8	7.20	205	0.55	0.80	1.20	0.16			2.57	1.30	0.05		153.61	1.50	0.008
			0.75	0.80	1.15	0.02	2.72	0.00	1.34	1.10	0.21	2.65			
9	7.30	243	15.03	9.72	26.45	0.78			81.74	39.00	10.09		173.38	1.04	0.010
			0.38	0.40	1.15	0.02		0.00	1.34	1.10	0.11				
10	7.10	564	0.32	0.38	0.54	0.02	1.26	0.00	0.65	0.40	0.18	1.23	431.73	1.09	0.022
			6.41	4.62	12.42	0.78			39.65	14.18	8.65				
11	7.00	551	0.16	0.19	0.54	0.02			0.65	0.40	0.09		394.17	1.30	0.022
			0.38	0.45	1.16	0.04	2.03	0.00	1.42	0.30	0.25	1.97			
12	7.15	615	7.62	5.47	26.68	1.56			86.62	10.64	12.01		448.37	1.25	0.025
			0.19	0.23	1.16	0.04		0.00	1.42	0.30	0.13				
13	7.30	897	0.60	0.72	1.01	0.04	2.37	0.00	1.31	0.70	0.41	2.42	667.77	1.25	0.037
			12.02	8.75	23.23	1.56			79.91	24.82	19.69				
14	7.40	897	0.30	0.36	1.01	0.04			1.31	0.70	0.21		642.77	1.03	0.037
			1.50	1.30	2.44	0.21	5.45	0.00	4.19	0.70	0.68	5.57			
15	7.20	1038	30.06	15.80	56.12	8.21			255.59	24.82	32.66		758.58	1.29	0.043
			0.75	0.65	2.44	0.21		0.00	4.16	0.70	0.34				
16	7.60	1038	1.45	1.49	2.15	0.21	5.30	0.00	3.12	1.60	0.72	5.44	769.18	1.28	0.043
			29.06	18.10	49.45	8.21			190.32	56.72	34.58				
17	7.60	1089	0.73	0.75	2.15	0.21			3.12	1.60	0.36		659.39	1.29	0.044
			1.50	1.80	2.35	0.27	5.92	0.00	4.01	1.63	0.43	6.07			
18	7.50	1025	30.06	21.87	54.05	10.56			244.61	57.78	20.65		744.31	1.36	0.042
			0.75	0.90	2.35	0.27		0.00	4.01	1.63	0.22				
19	7.60	1025	1.70	2.20	4.58	0.42	8.90	0.00	6.10	1.90	0.68	8.68	739.74	1.04	0.042
			34.07	26.73	105.34	16.42			372.10	67.36	32.66				
20	7.80	205	0.85	1.10	4.58	0.42			6.10	1.90	0.34		1271.84	1.28	0.077
			1.68	2.15	4.47	0.56	8.86	0.00	5.03	2.90	0.75	8.68			
21	7.70	192	33.68	26.12	102.81	21.90			306.83	102.81	36.02		1479.41	1.47	0.086
			0.84	1.08	5.03	0.56		0.00	5.03	2.90	0.38				
22	7.70	192	2.10	2.40	5.31	0.42	10.23	0.00	6.67	2.50	0.80	9.97	1389.58	1.22	0.081
			42.08	29.16	122.13	16.42			406.87	88.63	38.42				
			1.05	1.20	5.31	0.42			6.67	2.50	0.40				
			2.05	2.40	5.15	0.42	10.02	0.00	6.83	2.65	0.80	10.28			
			41.08	29.16	118.45	16.42			416.63	93.94	38.42				
			1.03	1.20	5.15	0.42		0.00	6.83	2.65	0.40				
			2.30	2.00	5.80	0.52	10.62	0.00	6.11	2.70	1.54	10.35			
			46.09	24.30	13.34	20.33			372.71	95.72	73.97				
			1.15	1.00	5.80	0.52			6.11	2.70	0.77				
			2.25	2.30	5.11	0.43	10.09	0.00	6.43	2.60	0.79	9.82			
			45.09	27.95	117.53	16.81			392.23	92.17	37.94				
			1.13	1.15	5.11	0.43		0.00	6.43	2.60	0.40				
			2.25	2.40	5.07	0.41	10.13	0.00	6.14	3.00	0.78	9.92			
			45.09	29.16	116.61	16.03			374.54	106.35	37.46				
			1.13	1.20	5.07	0.41			6.14	3.00	0.39				
			2.00	3.50	11.42	0.63	17.55	0.00	10.27	6.20	0.64	17.11			
			40.08	42.53	262.66	24.63			626.47	219.79	30.74				
			1.00	1.75	11.42	0.63		0.00	10.27	6.20	0.32				
			2.90	4.10	12.01	0.74	19.75	0.00	11.25	6.80	2.29	20.34			
			58.12	49.82	276.23	28.93			686.25	241.06	109.99				
			1.45	2.05	12.01	0.74			11.25	6.80	1.15				
			3.65	2.60	11.80	0.50	18.55	0.00	10.47	6.70	1.84	19.01			
			73.15	31.59	273.47	19.55			638.67	237.52	88.38				

Cuadro 10. Continuación.

No	pH	CE µmhos-cm ⁻¹	mmolc L ⁻¹										R.S.E mg L ⁻¹	% Error	PRESION OSMOTICA MPa		
			Ca	Mg	Na	K	suma	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	suma					
23	7.50	115	1.83	1.30	11.80	0.50			10.47	6.70	0.92			850.01	1.25	0.048	
			2.40	2.10	6.26	0.44	11.20	0.00	7.03	3.50	0.95	11.48					
			48.10	25.52	143.98	17.20			428.83	124.08	45.63						
24	7.50	64	1.20	1.05	6.26	0.44			7.03	3.50	0.48			469.23	1.18	0.027	
			1.15	1.40	3.71	0.13	6.39	0.00	3.95	1.70	0.59	6.24					
			23.05	17.01	85.33	5.08			240.95	60.27	28.34						
25	7.60	63	0.58	0.70	3.71	0.13			3.95	1.70	0.30			463.23	1.17	0.026	
			1.10	1.40	3.45	0.12	6.07	0.00	4.08	1.60	0.53	6.21					
			22.04	17.01	79.35	4.69			248.88	56.72	25.46						
26	7.00	1089	0.55	0.70	3.45	0.12			4.08	1.60	0.27			790.14	1.25	0.045	
			2.02	2.60	5.60	0.42	10.64	0.00	6.16	3.70	1.05	10.91					
			40.48	31.59	128.80	16.42			375.76	131.17	50.43						
27	7.60	1409	1.01	1.30	5.60	0.42			6.16	3.70	0.53			990.45	1.23	0.058	
			2.70	3.20	7.44	0.52	13.86	0.00	7.72	5.00	0.80	13.52					
			54.11	38.88	171.12	20.33			470.92	177.25	38.42						
28	7.80	1218	1.35	1.60	7.44	0.52			7.72	5.00	0.40			887.87	1.22	0.051	
			1.94	2.60	7.00	0.34	11.88	0.00	6.86	3.80	1.51	12.17					
			38.88	31.59	161.00	13.29			418.46	134.71	72.53						
29	7.80	384.00	0.97	1.30	7.00	0.34			6.86	3.80	0.76			289.50	1.03	0.016	
			0.90	1.15	1.66	0.06	3.77	0.00	3.11	0.50	0.08	3.69					
			18.04	13.97	38.18	2.35			189.71	17.73	3.84						
30	7.70	41	0.45	0.58	1.66	0.06			3.11	0.50	0.04			299.36	1.25	0.015	
			2.07	1.10	0.85	0.02	4.04	0.00	2.92	0.70	0.32	3.94					
			41.48	13.37	19.55	0.78			178.12	24.82	15.37						
31	7.00	256	1.04	0.55	0.85	0.02			2.92	0.70	0.16			181.39	1.41	0.009	
			1.21	0.90	0.40	0.01	2.52	0.00	1.67	0.50	0.28	2.45					
			24.25	10.94	9.20	0.39			101.87	17.73	13.45						
32	7.40	897	0.61	0.45	0.40	0.01			1.67	0.50	0.14			647.67	1.03	0.037	
			1.70	1.90	5.08	0.17	8.85	0.00	5.25	2.40	1.02	8.67					
			34.07	23.09	116.84	6.65			320.25	85.08	48.99						
33	7.70	512	0.85	0.95	5.08	0.17			5.25	2.40	0.51			400.41	1.31	0.021	
			2.90	0.94	0.80	0.40	5.04	0.00	3.99	0.70	0.22	4.91					
			58.12	21.62	18.40	15.64			243.39	24.82	10.57						
34	7.90	288	1.45	0.94	0.80	0.40			3.99	0.70	0.22			216.65	1.18	0.012	
			0.70	1.12	0.75	0.20	2.77	0.00	2.28	0.50	0.06	2.84					
			14.03	13.61	17.25	7.82			139.08	17.73	2.88						
35	7.90	282	0.35	0.56	0.75	0.20			2.28	0.50	0.03			209.42	1.27	0.011	
			0.70	1.16	0.78	0.15	2.79	0.00	2.19	0.45	0.08	2.72					
			14.03	14.09	17.94	5.87			133.59	15.95	3.84						
Media	7.42	590	0.35	0.58	0.78	0.15			2.19	0.45	0.04			428.77	0.00	0.031	
			1.35	1.50	2.48	0.17	5.80	0.00	3.73	1.41	0.42	5.76					
			27.01	18.50	53.41	6.75			227.42	50.16	19.99						
Mediana	7.50	64	0.68	0.76	2.48	0.18			3.73	1.41	0.21			469.23	1.24	0.266	
			1.70	1.80	3.25	0.23	6.39	0.00	4.19	1.60	0.59	6.24					
			34.07	21.87	56.12	8.99			255.59	56.72	28.34						
Moda	7.60	128	0.85	0.94	3.25	0.23			4.16	1.60	0.30			0.00	1.20	0.050	
			1.70	2.60	0.00	0.42	1.26	0.00	6.67	0.40	0.10	1.23					
			34.07	31.59	0.00	16.42			406.87	14.18	4.80						
			0.85	1.30	0.00	0.42			6.67	0.40	0.40						

conductividad eléctrica de $128 \mu\text{S cm}^{-1}$. Las aguas de la Presa Taximhay ya poseen una mayor concentración, debiéndose esto, a que los cauces que se embalsan en la Presa Taximhay, ya conducen aguas con una cierta cantidad de sales que son producto de los procesos del intemperismo. Las aguas de la muestra 12 que pertenecen a la estación de muestreo de la Presa Endhó tienen una conductividad eléctrica de $615 \mu\text{S cm}^{-1}$. La Presa Endhó recibe aguas residuales a través del tajo de Nochistongo. Las aguas de la Presa Rojo Gómez de la muestra 13 posee una conductividad eléctrica de $897 \mu\text{S cm}^{-1}$. Las aguas residuales mezcladas, que se embalsan en la Presa Rojo Gómez son de esta concentración, porque la Red Hidrográfica del Valle del Mezquital ya conduce aguas de diferente origen, que son fluviales y residuales. La Presa Rojo Gómez es un vaso regulador del sistema de riego del Valle del Mezquital.

La muestra de agua 26 que corresponde al puente Tasquillo, en donde la estación de muestreo es del Río Tula; la conductividad eléctrica de ésta agua es de $1089 \mu\text{S cm}^{-1}$. La muestra de agua 27 del último vaso regulador que corresponde al embalse de Zimapán tiene una conductividad eléctrica de $1409 \mu\text{S cm}^{-1}$. El Río Tula, que sirve de cauce principal de control de descargas y de recibimiento de las aguas que drenan por todo el sistema de riego, se embalsan en una última parte en la Presa Zimapán. La Presa Zimapán descarga sus aguas al Río Moctezuma que continua su curso por diferentes tramos de la Sierra Madre Oriental. En el tramo Río Moctezuma-Río Claro, se muestrearon aguas que derivan de la Sierra Madre Oriental, que está compuesta de calizas con diferentes grados de fracturamiento y con estratigrafía muy variada.

La muestra de agua de la estación de muestreo del Río Amajac tiene una conductividad eléctrica de $41 \mu\text{S cm}^{-1}$. El calcio y el magnesio predominan en éstas aguas. La muestra de agua 31 de la estación de muestreo del Río Claro posee una conductividad eléctrica de $256 \mu\text{S cm}^{-1}$. Las aguas del Río Claro hacen su curso por calizas de la Sierra Madre Oriental. Las aguas del Río Claro son ricas en iones de calcio y de magnesio. Las aguas del Río Claro intemperizan calizas de la Sierra Madre Oriental.

En la figura 2; se presenta la distribución de los diferentes cationes y aniones de la Red Hidrográfica del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro. En ésta figura 2 se puede observar que la concentración electrolítica de las aguas, al inicio de los escurrimientos de la Sierra del Carbón-Presa Taximhay son de muy baja concentración total. Esta concentración de sales varía como sigue: 2.5-4.0-5.0 y $6.0 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1}$. Las estaciones de muestreo que poseen estas concentraciones se encuentran dentro del trayecto Presa Taximhay-Presa Requena. En las estaciones de muestreo 1-6: la relación $\text{Ca}+\text{Mg} > \text{Na}$ es en promedio $\text{Ca}+\text{Mg} = 2.4 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1}$ y el ión sodio es en promedio $\text{Na} = 1.40 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1}$, de tal manera que el valor de la Relación $\text{Ca}+\text{Mg} / \text{Na}$ es de $2.40 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1} / 1.4 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1}$.

En estas condiciones las aguas que escurren desde la Presa Taximhay hasta la Presa Requena con aguas de baja concentración y desde el punto de vista de los

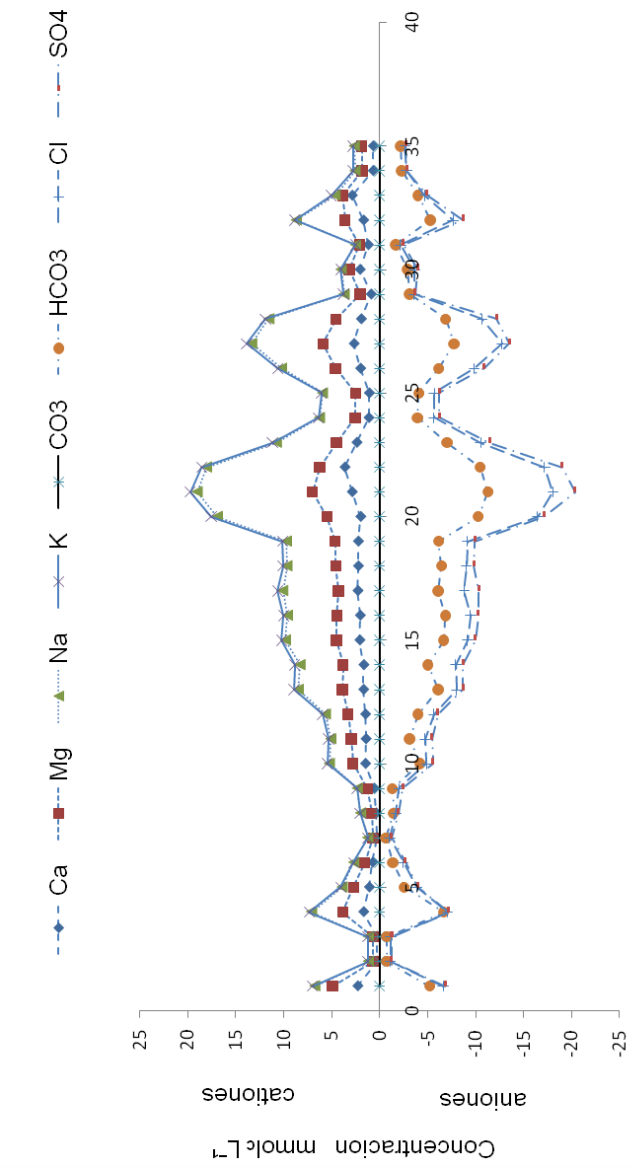


Figura 2. Composición iónica de las aguas que circulan en el cauce general Rio Tula-Rio Moctezuma - Rio Claro. Estados de Hidalgo, San Luis Potosi, Mexico. Muestreo 1 .Primavera 2006

contenidos de los iones de sodio, estas aguas no son de peligrosidad para el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Las aguas de las estaciones de muestreo 1-6 son cálcico-magnésica-bicarbonatadas. De acuerdo con la figura 2 de distribución de cationes y aniones a partir de la muestra de agua 10 y que corresponde a la estación de muestreo Río Tula hasta la muestra de agua 27, que pertenece a la estación de muestreo Presa Zimapán, la concentración de sales aumenta variando de 615-897-1089-1409 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Estas aguas, muestras 10-27, pertenecen a canales y vasos de regulación de la Red Hidrográfica, correspondientes al sistema de riego, de la zona del Valle del Mezquital. Las aguas que riegan el Valle del Mezquital son bicarbonatadas-sódicas es decir predominan el NaHCO_3 . A partir de la Presa Zimapán, Estado de Hidalgo, la composición de las aguas es cálcico-magnésico-bicarbonatada debido a que el Río Moctezuma y el Río Claro reciben aguas de la Sierra Madre Oriental.

5.1.2 MUESTREO 2 OTOÑO 2007.

En el cuadro 11; se presenta la ubicación geográfica con sus coordenadas de las estaciones de muestreo del muestreo 2 Otoño 2007, también, en éste cuadro se presentan las altitudes de las diferentes estaciones de muestreo. La estación con mayor altitud es la del Río Buenaventura con 2175 msnm. La altitud de la Presa Taximhay es de 2250 msnm. La Presa Requena tiene una altitud de 2150 msnm. Los dos embalses mencionados regulan los escurrimientos de las partes altas que forman el Río Tula. Los escurrimientos propiamente del Río Tula se embalsan en la Presa Endhó a una altitud de 2005 msnm, las aguas que se reciben en la Presa Endhó ya son residuales y vienen derivadas directamente de la ciudad de México a través del Tajo de NOCHISTONGO. En éste tramo de recorrido, estas aguas riegan algunas zonas de Tepeji del Río, Hidalgo.

En las zonas de Alfajáyucan, Hidalgo, las aguas del Río Tula se embalsan en la Presa Rojo Gómez para ser distribuidos posteriormente en la zona de Riego de Alfajayucan y de Portezuelo para satisfacer las necesidades de riego. La Presa Rojo Gómez tiene una altitud de 1986 msnm. La Presa Vicente Aguirre tiene una

Cuadro 11. Localización geográfica de las estaciones de muestreo de las aguas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro. Estados de Hidalgo y San Luis Potosí México. Muestreo 2 Otoño 2007.

No.	IDENTIFICACION	Fecha colecta	COORDENADAS		msnm
			N	W	
1	RIO BUENAVENTURA	09-mar-07	19°30'15"	99°15'5.7"	2175
2	RIO TEPEJI	09-mar-07	19°18'20"	99°20'18"	2150
3	RIO TEPEJI AFLUENCIA CON RIO BUENAVENTURA	09-mar-07	19°15'30"	99°15'06"	2123
4	SANTA MARIA QUELITES (BALNEARIO SAN VICENTE)	09-mar-07	19°15'45"	99°15'07"	2248
5	EL CHORRITO	09-mar-07	19°48'15"	99°22'06"	2100
6	PUENTE GOLONDRINAS	09-mar-07	19°46'20"	99°25'08"	2150
7	TAXIMHAY	09-mar-07	19°48'25"	99°28'18"	2250
8	PRESA LA REQUENA	09-mar-07	19°49'36"	99°18'40"	2150
9	RIO TULA (PUENTE CRUZ AZUL)	09-mar-07	20°09'40"	99°19'38"	2029
10	RIO TULA (SAN MARCOS)	10-mar-07	20°10'08"	99°19'58"	2016
11	PUENTE METLAC	10-mar-07	20°12'19"	99°20'05"	2020
12	PRESA ENDHÓ	10-mar-07	20°15'27"	99°22'09"	2005
13	PRESA ROJO GÓMEZ	10-mar-07	20°26'57"	99°17'25"	1986
14	PRESA VICENTE AGUIRRE	10-mar-07	20°28'18"	99°26'18"	1859
15	RIO TULA (IXMIQUILPAN)	10-mar-07	20°29'10"	99°14'47"	1691
16	RÍO TULA (TLACOTLAPILCO)	10-mar-07	20°22'18"	99°12'30"	1600
17	TLACOTLAPILCO	10-mar-07	20°22'32"	99°12'36"	1602
18	RÍO TULA (CHILCUAUTLA)	10-mar-07	20°19'46"	99°12'42"	1940
19	RÍO TULA (PROGRESO)	11-mar-07	20°25'37"	99°14'38"	1884
20	BALNEARIO PROGRESO	11-mar-07	20°25'40"	99°14'39"	1880
21	ARROYO EL TEPHÉ	11-mar-07	20°28'40"	99°12'56"	1763
22	PRESA DEBODHÉ	11-mar-07	20°29'18"	99°10'13"	2000
23	TZINDEJE (BALNEARIO)	11-mar-07	20°32'26"	99°16'32"	1825
24	DOXEY (BALNEARIO)	11-mar-07	20°31'08"	99°16'08"	1730
24'	BALNEARIO DOXEY (SALIDA)	11-mar-07	20°31'10"	99°14'32"	1705
25	TZINDEJE (BALNEARIO)	11-mar-07	20°31'18"	99°17'02"	1822
26	RÍO TULA PUENTE TASQUILLO ING. CORIA	11-mar-07	20°38'10"	99°29'42"	1708
27	PRESA ZIMAPÁN	11-mar-07	21°14'09"	98°52'07"	1975
28	RIO VEGA LARGA (MOCTEZUMA , SAN LUIS POTOSI)	12-mar-07	21°14'15"	98°45'33"	190
29	NACIMIENTO RANCHO QUEMADO	12-mar-07	21°14'01"	98°45'12"	200
30	RIO AMAJAC	12-mar-07	21°14'26"	98°45'11"	140
31	RIO CLARO (AFLUENCIA CON AMAJAC)	12-mar-07	21°15'00"	98°45'25"	190
32	RIO MOCTEZUMA (TERMOELECTRICA) LA VEGA	12-mar-07	21°09'28"	98°54'25"	198
33	RIO CHAPANTONGO	12-mar-07	21°14'43"	98°40'18"	160
34	ADJUNTAS (MINAS)	12-mar-07	20°55'09"	99°16'3"	1840
35	AXCLA DE TERRAZAS	12-mar-07	21°26'01"	98°52'37"	75
36	TLACUILOLA	12-mar-07	21°02'8.2"	99°36'47"	700
37	CHUVEJE SIERRA GORDA	12-mar-07	21°07'18"	99°35'45"	1576
38	PEÑA MILLER	12-mar-07	21°03'11"	99°48'55"	1370
39	ADJUNTAS SALIDA CASA DE MAQUINAS RIO MOCTEZUMA	12-mar-07	20°48'12"	99°29'46"	1900
40	RIO TOLIMAN	12-mar-07	20°48'32"	99°29'33"	1600
41	LOMO DE TORO(MINA)	12-mar-07	20°46'36"	99°18'08"	1720
42	TOLANTONGO	13-mar-07	20°38'39"	99°0'11"	1400
43	RÍO TLAPAYACO PUENTE SAN PABLO	13-mar-07	20°28'06"	98°42'18"	1410
44	RIO METZTILÁN	13-mar-07	20°35'54"	98°46'8.6"	1340
45	SAN AGUSTIN TLAXIACA(potable)	13-mar-07	20°13'18"	98°48'16"	2350
46	SAN AGUSTIN TLAXIACA (lluvia)	13-mar-07	20°13'18"	98°48'16"	2350
47	TEPEXPAN	13-mar-07	19°38'19"	98°49'12"	2400

altitud de 1859 msnm. Las aguas de la Presa Vicente Aguirre riegan la zona más septentrional del Valle del Mezquital.

En el lado éste del valle del Mezquital se localiza la Presa Debodhé. Este embalse se encuentra en la zona de Actopan-Ixmiquilpan. Los lomeríos de ésta zona de Debodhé son de origen calizo. La altitud de la Presa es de 2000 msnm.

Las aguas que escurren hacia la Presa Debodhé son residuales de la zona de canales de Actopan y de pozos profundos de la depresión de la zona del Salvador. El último embalse del Río Tula es la Presa Zimapán que tiene una altitud de 1975 msnm. La estación de muestreo del Río Amajac tiene una altitud de 140 msnm.

En el cuadro 12; se presentan las composiciones iónicas de las muestras de agua de las 47 estaciones de muestreo del Muestreo 2 Otoño 2007.

La muestra de agua de la estación de muestreo 7 que corresponde a la Presa Taximhay es de muy baja concentración ya que tiene una conductividad eléctrica de $120 \mu\text{S cm}^{-1}$. La composición iónica de estas aguas es cálcico-magnésica-bicarbonatada ya que $\text{Ca} + \text{Mg} = 0.99 \text{ mmolc L}^{-1}$ y el contenido de sodio es de $0.12 \text{ mmolc L}^{-1}$. Las aguas que se embalsan en la Presa Taximhay derivan de la Sierra del Carbón Edo de México. Las aguas de la Presa Requena poseen una concentración de $420 \mu\text{S cm}^{-1}$. El primer vaso regulador es la Presa Taximhay. Las muestras 1 y 4 que corresponden al Río Buenaventura y Santa María Quelites (Balneario) son de una concentración de $760 \mu\text{S cm}^{-1}$ y de $640 \mu\text{S cm}^{-1}$. La concentración de iones de cloro en la muestra de agua del Río Buenaventura es de $2.30 \text{ mmolc L}^{-1}$.

El Río Buenaventura recibe descargas de zonas urbanas y de la pequeña industria.

La muestra 9 que corresponde a la estación de muestreo del Río Tula en la localidad de Cruz Azul tiene una concentración de $660 \mu\text{S cm}^{-1}$.

Cuadro 12. Composición iónica en las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro. Estados de Hidalgo y San Luis Potosí, México. Muestreo 2 Otoño 2007.

No	pH	CE <small>µmhos cm⁻¹</small>	mmolc L ⁻¹										R.S.E mg L ⁻¹	% Error	Presión Osmc MPa
			Ca	Mg	Na	K	suma	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	suma			
1	6.90	756	2.30	2.81	2.10	0.25	7.46	0.00	4.77	2.30	0.20	7.27	530.84	1.26	0.030
			46.09	34.14	48.30	9.78		0.00	290.97	81.54	9.61				
			1.15	1.41	2.10	0.25		0.00	4.77	2.30	0.10				
2	7.00	270	1.20	1.10	0.30	0.06	2.66	0.00	1.75	0.60	0.25	2.60	190.92	1.14	0.010
			24.05	13.37	6.90	1.91		0.00	106.75	21.27	12.01				
			0.60	0.55	0.30	0.06		0.00	1.75	0.60	0.13				
3	6.90	297	1.20	1.31	0.34	0.08	2.93	0.00	1.82	0.80	0.24	2.86	205.87	1.21	0.011
			24.05	15.92	7.82	3.13		0.00	111.02	28.36	11.53				
			0.60	0.66	0.34	0.08		0.00	1.82	0.80	0.12				
4	6.50	640	1.30	3.12	1.70	0.23	6.35	0.00	3.76	2.40	0.06	6.22	437.96	1.03	0.025
			26.05	37.91	39.10	8.99		0.00	229.36	85.08	2.88				
			0.65	1.56	1.70	0.23		0.00	3.76	2.40	0.03				
5	6.60	390	1.10	2.18	0.40	0.16	3.84	0.00	2.36	1.10	0.29	3.75	265.49	1.19	0.014
			22.04	26.49	9.20	6.26		0.00	143.96	38.40	13.93				
			0.55	1.09	0.40	0.16		0.00	2.36	1.10	0.15				
6	7.00	120	0.70	0.37	0.12	0.03	1.22	0.00	0.74	0.25	0.19	1.18	87.30	1.67	0.004
			14.03	4.50	2.76	1.17		0.00	45.14	8.86	9.13				
			0.35	0.19	0.12	0.03		0.00	0.74	0.25	0.10				
7	7.10	120	0.60	0.39	0.12	0.03	1.14	0.00	0.71	0.25	0.14	1.10	81.17	1.79	0.004
			12.02	4.74	2.76	1.17		0.00	43.31	8.86	6.72				
			0.30	0.20	0.12	0.03		0.00	0.71	0.25	0.07				
8	6.45	420	1.40	2.06	0.52	0.13	4.11	0.00	2.55	0.80	0.66	4.01	291.45	1.23	0.016
			28.06	25.03	11.96	5.08		0.00	155.55	28.36	31.70				
			0.70	1.03	0.52	0.13		0.00	2.55	0.80	0.66				
9	7.20	660	2.90	2.26	1.20	0.20	6.56	0.00	3.52	1.50	1.37	6.39	463.79	1.31	0.024
			58.12	27.46	27.60	7.82		0.00	214.72	53.18	65.80				
			1.45	1.13	1.20	0.20		0.00	3.52	1.50	0.69				
10	7.30	1050	2.00	4.07	3.85	0.48	10.40	0.00	5.20	3.30	1.68	10.18	697.97	1.07	0.041
			48.08	49.45	88.55	18.77		0.00	317.20	81.54	80.69				
			1.00	2.04	3.85	0.48		0.00	5.20	3.30	0.84				
11	7.40	1080	2.40	3.99	3.80	0.47	10.66	0.00	5.50	3.00	1.88	10.38	749.20	1.33	0.042
			48.10	48.48	87.40	18.38		0.00	335.50	106.35	90.30				
			1.20	2.00	3.80	0.47		0.00	5.50	3.00	0.94				
12	8.40	1130	2.40	3.35	4.85	0.60	11.20	0.25	5.19	3.90	1.61	10.95	778.76	1.13	0.045
			48.10	40.70	111.55	23.46		7.50	316.59	138.26	77.33				
			1.20	1.68	4.85	0.60		0.13	5.19	3.90	0.81				
13	8.20	870	1.60	2.95	3.60	0.49	8.64	0.30	3.80	3.00	1.30	8.40	590.67	1.38	0.034
			32.06	35.48	82.80	19.16		9.00	231.80	106.35	62.44				
			0.80	1.48	3.60	0.49		0.15	3.80	3.00	0.65				
14	8.25	890	1.80	2.90	3.60	0.50	8.80	0.60	3.42	3.10	1.46	8.58	591.91	1.27	0.035
			36.07	35.24	82.80	19.55		18.00	208.62	109.90	70.12				
			0.90	1.45	3.60	0.50		0.30	3.42	3.10	0.73				
15	8.30	1380	3.90	3.96	5.20	0.59	13.65	1.40	4.77	4.70	2.44	13.31	903.43	1.26	0.052
			78.16	48.11	119.60	23.07		42.00	290.97	166.62	117.19				
			1.95	1.98	5.20	0.59		0.70	477.00	4.70	1.22				
16	8.10	1400	4.00	4.10	5.15	0.61	13.86	1.40	5.99	3.80	2.39	13.58	947.75	1.00	0.053
			80.16	49.82	118.45	23.85		42.00	365.39	134.71	114.79				
			2.00	2.05	5.15	0.61		0.70	5.99	3.80	1.20				
17	7.50	1080	4.00	3.28	2.80	0.58	10.66	0.00	3.93	3.80	2.69	10.42	724.94	1.14	0.040
			80.16	39.85	64.40	22.68		0.00	239.73	134.71	129.20				
			2.00	1.64	2.80	0.58		0.00	3.93	3.80	1.35				
18	7.75	1400	4.20	4.05	5.00	0.61	13.86	0.00	6.60	4.70	2.22	13.52	966.95	1.22	0.055
			84.17	49.12	115.00	23.85		0.00	402.60	166.62	106.63				
			2.10	2.03	5.00	0.61		0.00	606.00	4.70	1.11				

Cuadro 12. Continuación.

No	pH	CE <small>µmhos cm⁻¹</small>	mmolc L ⁻¹										R.S.E mg L ⁻¹	% Error	Presión Osmótica MPa
			Ca	Mg	Na	K	suma	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	suma			
19	7.70	1510	3.90	4.64	5.85	0.54	14.93	0.00	6.84	5.40	2.27	14.51	1028.06	1.43	0.059
			78.16	56.38	134.55	21.11		0.00	417.24	191.43	109.03				
20	7.70	1730	1.95	2.32	5.85	0.54		0.00	6.84	5.40	1.14		1177.16	1.35	0.070
			2.00	5.63	8.86	0.57	17.06	0.00	7.63	6.10	2.87	16.60			
21	7.80	2050	40.08	68.40	203.78	22.29		0.00	465.43	216.25	137.85		1381.06	1.26	0.081
			1.00	2.82	8.86	0.57		0.00	7.63	6.10	1.44				
22	8.25	1620	4.36	4.20	10.95	0.76	20.27	0.00	6.21	7.60	5.95	19.76	1056.10	1.25	0.066
			87.37	51.03	251.85	29.72		0.00	378.81	269.42	285.78				
23	8.00	1620	2.18	2.10	10.95	0.76		0.00	6.21	7.60	2.98		1101.35	1.31	0.063
			1.60	3.98	9.90	0.52	16.00	0.40	4.47	7.40	3.33	15.60			
24	7.90	620	32.06	48.36	227.70	20.33		12.00	272.67	262.33	159.94		421.80	1.12	0.022
			0.80	1.99	9.90	0.52		0.20	4.47	7.40	1.67				
24'	7.50	630	4.50	4.17	6.80	0.54	16.01	0.00	6.50	5.70	3.39	15.59	430.47	1.13	0.023
			90.18	50.67	156.40	21.11		0.00	396.50	202.07	162.82				
25	7.50	590	2.25	2.09	6.80	0.54		0.00	6.50	5.70	1.70		407.13	1.29	0.023
			2.40	2.04	1.50	0.14	6.08	0.00	2.64	1.50	1.80	5.94			
26	7.90	1490	48.10	24.79	34.50	5.47		0.00	161.04	53.18	86.45		1033.12	1.45	0.058
			1.20	1.02	1.50	0.14		0.00	2.64	1.50	1.90				
27	8.30	1370	2.10	2.22	1.60	0.18	6.10	0.00	2.57	1.90	1.77	6.24	921.48	1.48	0.052
			42.08	26.97	36.80	7.04		0.00	156.77	67.36	85.01				
28	8.30	1310	1.05	1.11	1.60	0.18		0.00	2.57	1.90	0.89		855.12	1.32	0.048
			2.00	2.49	1.20	0.18	5.87	0.00	3.15	1.70	0.87	5.72			
29	7.80	370	40.08	30.25	27.60	7.04		0.00	192.15	60.27	41.76		268.06	1.26	0.013
			1.00	1.25	1.20	0.18		0.00	3.15	1.70	0.87				
30	8.10	430	4.50	3.43	5.85	0.47	14.25	0.00	6.66	5.00	3.01	14.67	286.59	1.18	0.014
			90.18	41.67	134.55	18.38		0.00	406.26	177.25	144.57				
31	8.05	270	2.25	1.72	5.85	0.47		0.00	6.66	5.00	1.51		190.85	1.33	0.009
			3.90	3.45	5.30	0.51	13.16	1.00	5.23	4.70	2.62	13.55			
32	8.00	1030	78.16	41.92	121.90	19.94		30.00	319.03	166.62	125.84		716.78	1.25	0.038
			1.95	1.73	5.30	0.51		0.50	5.23	4.70	1.31				
33	7.60	350	4.30	3.81	4.35	0.45	12.91	1.20	4.45	4.10	2.82	12.57	250.45	1.33	0.013
			86.17	46.29	100.05	17.60		36.00	271.45	145.35	135.44				
34	7.00	1830	2.15	1.91	4.35	0.45		0.60	4.45	4.10	1.41		1238.88	0.96	0.049
			3.03	0.45	0.12	0.02	3.62	0.00	2.59	0.80	0.14	3.53			
35	7.70	280	60.72	5.47	2.76	0.78		0.00	157.99	28.36	6.72		211.21	1.28	0.010
			1.52	0.23	0.12	0.02		0.00	2.59	0.80	0.07				
			2.70	1.42	0.12	0.03	4.27	0.00	1.58	1.20	1.39	4.17	190.85	1.33	0.009
			54.11	17.25	2.76	1.17		0.00	96.38	42.54	66.76				
			1.35	0.71	0.12	0.03		0.00	1.58	1.20	0.70		190.85	1.33	0.009
			2.46	0.15	0.05	0.01	2.67	0.00	1.32	0.60	0.68	2.60			
			49.30	1.82	1.15	0.39		0.00	80.52	21.27	32.66		716.78	1.25	0.038
			1.23	0.08	0.05	0.01		0.00	1.32	0.60	0.34				
			4.30	2.46	2.80	0.32	9.88	0.00	4.70	3.00	2.43	10.13	190.85	1.33	0.009
			86.17	29.89	64.40	12.51		0.00	286.70	106.35	116.71				
			2.15	1.23	2.80	0.32		0.00	4.70	3.00	1.22		250.45	1.33	0.013
			1.70	1.31	0.20	0.23	3.44	0.00	2.40	0.80	0.15	3.35			
			34.07	15.92	4.60	8.99		0.00	146.40	28.36	7.20		1238.88	0.96	0.049
			0.85	0.66	0.20	0.23		0.00	2.40	0.80	0.08				
			15.66	2.00	0.25	0.17	18.08	0.00	1.80	1.80	14.13	17.73	1238.88	0.96	0.049
			313.83	24.30	5.75	6.65		0.00	109.80	63.81	678.66				
			7.83	1.00	0.25	0.17		0.00	1.80	1.80	7.07		211.21	1.28	0.010
			2.53	0.10	0.05	0.01	2.69	0.00	2.05	0.60	0.11	2.76			
			50.70	1.22	1.15	0.39		0.00	125.05	21.27	5.28		211.21	1.28	0.010
			1.27	0.05	0.05	0.01		0.00	2.05	0.60	0.06				

Cuadro 12. Continuación.

No	pH	CE <small>µmhos cm⁻¹</small>	mmolc L ⁻¹										R.S.E mg L ⁻¹	% Error	Presión Osmótica MPa
			Ca	Mg	Na	K	suma	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	suma			
36	7.85	1240	4.40	3.37	3.80	0.38	11.95	0.00	5.56	4.00	2.70	12.26	867.29	1.30	0.047
			88.18	40.95	87.40	14.86		0.00	339.16	141.80	129.68				
37	7.90	330	2.20	1.69	3.80	0.38		0.00	5.56	4.00	1.35		250.19	1.22	0.012
			3.04	0.12	0.06	0.01	3.23	0.00	2.30	0.80	0.21	3.31			
38	7.40	1540	60.92	1.46	1.38	0.39		0.00	140.30	28.36	10.09		1013.21	1.16	0.044
			1.52	0.06	0.06	0.01		0.00	2.30	0.80	0.11				
39	7.70	1300	5.12	7.00	2.50	0.23	14.85	0.00	1.61	1.70	11.89	15.20	913.64	1.49	0.045
			102.60	85.05	57.50	8.99		0.00	98.21	60.27	571.08				
40	7.70	1520	2.56	3.50	2.50	0.23		0.00	1.61	1.70	5.95		980.65	1.37	0.042
			3.60	4.01	4.40	0.42	12.43	0.00	6.58	4.10	2.12	12.80			
41	7.75	290	72.14	48.72	101.20	16.42		0.00	401.38	145.35	101.82		208.93	1.23	0.009
			1.80	2.01	2.20	0.42		0.00	6.58	4.10	1.06				
42	7.50	960	5.97	8.14	0.80	0.13	15.04	0.00	1.83	1.30	11.50	14.63	633.97	1.31	0.034
			119.64	98.90	18.40	5.08		0.00	111.63	46.09	552.35				
43	7.60	800	2.99	4.07	0.80	0.13		0.00	1.83	1.30	5.75		569.68	1.22	0.025
			2.20	0.55	0.04	0.02	2.81	0.00	1.51	0.60	0.77	2.88			
44	7.55	560	44.09	6.69	0.92	0.78		0.00	92.11	21.27	36.98		395.40	1.29	0.019
			1.10	0.28	0.04	0.02		0.00	1.51	0.30	0.39				
45	7.90	450	3.30	4.23	1.75	0.21	9.49	0.00	4.01	3.20	2.03	9.24	319.49	1.36	0.017
			66.13	51.40	40.25	8.21		0.00	244.61	113.44	97.50				
46	7.85	350	1.65	2.12	1.75	0.21		0.00	4.01	3.20	1.02		221.88	1.33	0.012
			5.70	1.18	0.70	0.12	7.70	0.00	2.91	0.60	4.38	7.89			
47	7.35	580	114.23	14.34	16.10	4.69		0.00	177.51	21.27	210.37		394.01	1.24	0.022
			2.85	0.59	0.70	0.12		0.00	2.91	0.60	2.19				
Media	7.61	720	3.20	1.83	0.20	0.12	5.35	0.00	3.25	1.10	1.14	5.49	496.86	0.00	0.026
			64.13	22.23	4.60	4.69		0.00	198.25	39.00	54.75				
Mediana	7.70	840	1.60	0.92	0.20	0.12		0.00	3.25	1.10	0.57		580.18	1.26	0.032
			0.50	2.77	0.90	0.31	4.48	0.00	2.60	1.40	0.36	4.36			
Moda	7.70	270	10.02	33.66	31.91	12.12		0.00	158.60	49.63	17.29		0.00	0.00	0.00
			0.25	1.39	0.90	0.31		0.00	2.60	1.40	0.18				
			1.70	1.24	0.12	0.27	3.33	0.00	0.94	1.70	0.78	3.42			
			34.07	15.07	2.76	10.56		0.00	57.34	60.27	37.46				
			0.85	0.62	0.12	0.27		0.00	0.94	1.70	0.39				
			1.70	2.65	1.15	0.21	5.71	0.00	3.12	1.80	0.65	5.57			
			34.07	32.20	26.45	8.21		0.00	190.32	63.81	31.22				
			0.85	1.33	1.15	0.21		0.00	3.12	1.80	0.33				

La composición iónica de la localidad de Cruz Azul es cálcico-magnésico-bicarbonatada. La concentración del Calcio Ca^{+2} es de $2.90 \text{ mmolc L}^{-1}$ y la concentración del magnesio Mg^{+2} es de $2.26 \text{ mmolc L}^{-1}$. Las altas concentraciones de iones de calcio y magnesio en las aguas de la localidad de Cruz Azul, se debe a que las aguas del Río Tula en ésta localidad, el cauce del Río transcurre por sedimentos calizos. Los lomeríos de ésta zona son calizos intersectados por basaltos de edad pliocénica.

La muestra de agua de la estación de muestreo 12, que corresponde a la Presa Endhó, tiene una concentración de $1130 \mu\text{S cm}^{-1}$. Aquí es necesario hacer notar, que las aguas de la Presa Endhó son residuales que derivan de la zona norte urbano industrial de la ciudad de México. La composición iónica de las aguas de la Presa Endhó es cálcico-magnésico-sódica bicarbonatada. La concentración de calcio + magnesio es de $5.75 \text{ mmolc L}^{-1}$ y la concentración de sodio es de $4.85 \text{ mmolc L}^{-1}$.

Las aguas de la estación de muestreo 13, Presa Rojo Gómez, tienen una concentración de $870 \mu\text{S cm}^{-1}$. La concentración de calcio + magnesio es de $4.55 \text{ mmolc L}^{-1}$ y la concentración de sodio es de $3.60 \text{ mmolc L}^{-1}$.

Las aguas de la estación de muestreo 14, Presa Vicente Aguirre, tienen una concentración de $890 \mu\text{S cm}^{-1}$. La concentración de cloruros es de $3.10 \text{ mmolc L}^{-1}$.

Las aguas de la estación de muestreo 22, Presa Debohdé, poseen una concentración de sales de $1620 \mu\text{S cm}^{-1}$. La composición iónica de éstas aguas es la siguiente: La concentración de calcio + magnesio es de $5.58 \text{ mmolc L}^{-1}$. Y la concentración de sodio es de $9.90 \text{ mmolc L}^{-1}$. $\text{NaCa} + \text{Mg}$ es de 1.8. El ion sodio predomina sobre los iones de calcio + magnesio. Estas aguas tienen una cierta peligrosidad debido a las altas concentraciones de sodio.

Las aguas de la estación de muestreo 29, Río Amajac tienen una concentración de $370 \mu\text{S cm}^{-1}$. La concentración de calcio + magnesio es de $3.48 \text{ mmolc L}^{-1}$, y

la concentración de sodio es de $0.12 \text{ mmolc L}^{-1}$. Las aguas del Río Amajac son cálcico-magnésicas-bicarbonatadas. Las aguas del Río Amajac que fluyen por el cauce del Río Moctezuma atraviesan grandes espesores de calizas.

En la figura 3; se puede observar que la distribución de los iones expresa las zonas de los diferentes escurrimientos del cauce general Río Tula-Río Mocetzuma-Río Claro. La zona que corresponde a los escurrimientos que se embalsan en las presas de taximhay y Requena, son de baja concentración $2.0\text{-}7.0 \text{ mmolc L}^{-1}$, y el calcio y el magnesio son predominantes. Estas aguas no presentan problema alguno para los suelos y cultivos.

La zona que se riega con aguas residuales urbano-industriales que provienen de la ciudad de México y que siguen su curso en el cauce del Río Tula, en la figura 3, se presenta de manera muy notable cómo inicia el aumento de las concentraciones a partir de la muestra de agua 8, ya que en la estación de muestreo del Río Tula, en la localidad de Cruz Azul, hasta la muestra de agua 27 de la Presa Zimapán; las aguas de esta zona son sódico-bicarbonatadas. Las muestras de agua de las estaciones de muestreo de los Ríos Amajac y Claro tienen una concentración total de sales de $430\text{-}270 \text{ } \mu\text{S cm}^{-1}$ correspondientemente.

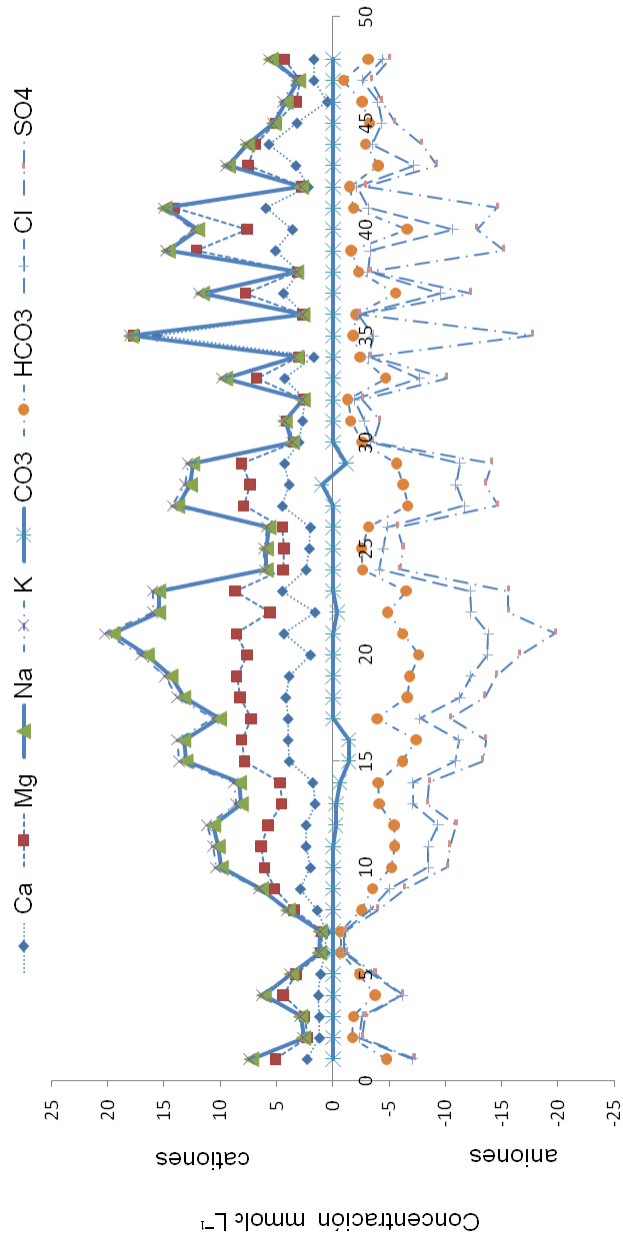


Figura 3 . Composición iónica de las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro Estados de Hidalgo y San Luis Potosí. México Muestreo 2 Otoño 2007.

5.2 CONCENTRACIÓN DE SALES EN LAS MUESTRAS DE AGUA mg L^{-1} .

5.2.1 MUESTREO 1 PRIMAVERA 2006.

En la figura 4; se presenta la Relación funcional mg L^{-1} (ppm)=fa (CE), en donde mg L^{-1} son las sales disueltas en un litro de solución, expresadas en mg ó ppm y la conductividad eléctrica está expresada en $\mu\text{S cm}^{-1}$. Esta figura corresponde a las aguas del muestreo 1, Primavera 2006. En general la calidad del agua de riego está determinada por la concentración y composición de los constituyentes disueltos o sea minerales sales.

La concentración total de sales solubles en las aguas de riego, para fines de diagnóstico y de clasificación, se pueden expresar en términos de conductividad eléctrica, la cual se puede determinar en forma rápida y precisa.

La relación funcional mg L^{-1} =fa (CE), para un grupo determinado de valores de soluciones que poseen distintas concentraciones de sales expresadas en mg, siempre será de una dependencia lineal. Esto es así porque los iones de las sales se disocian de manera equivalente. Las soluciones salinas acuosas son electroneutrales, es decir $\sum \text{cationes} = \sum \text{aniones}$, cuando éstos iones se expresan de manera equivalente. El coeficiente (a) determina los valores de la pendiente de

la línea recta y ésta expresa el tipo de sales solubles (Velázquez; *et. al.*,

2001). Para el muestreo, 1 Primavera 2006, el coeficiente a tiene un valor de $a=0.7065$. Este coeficiente corresponde a aguas bicarbonatadas-sódicas.

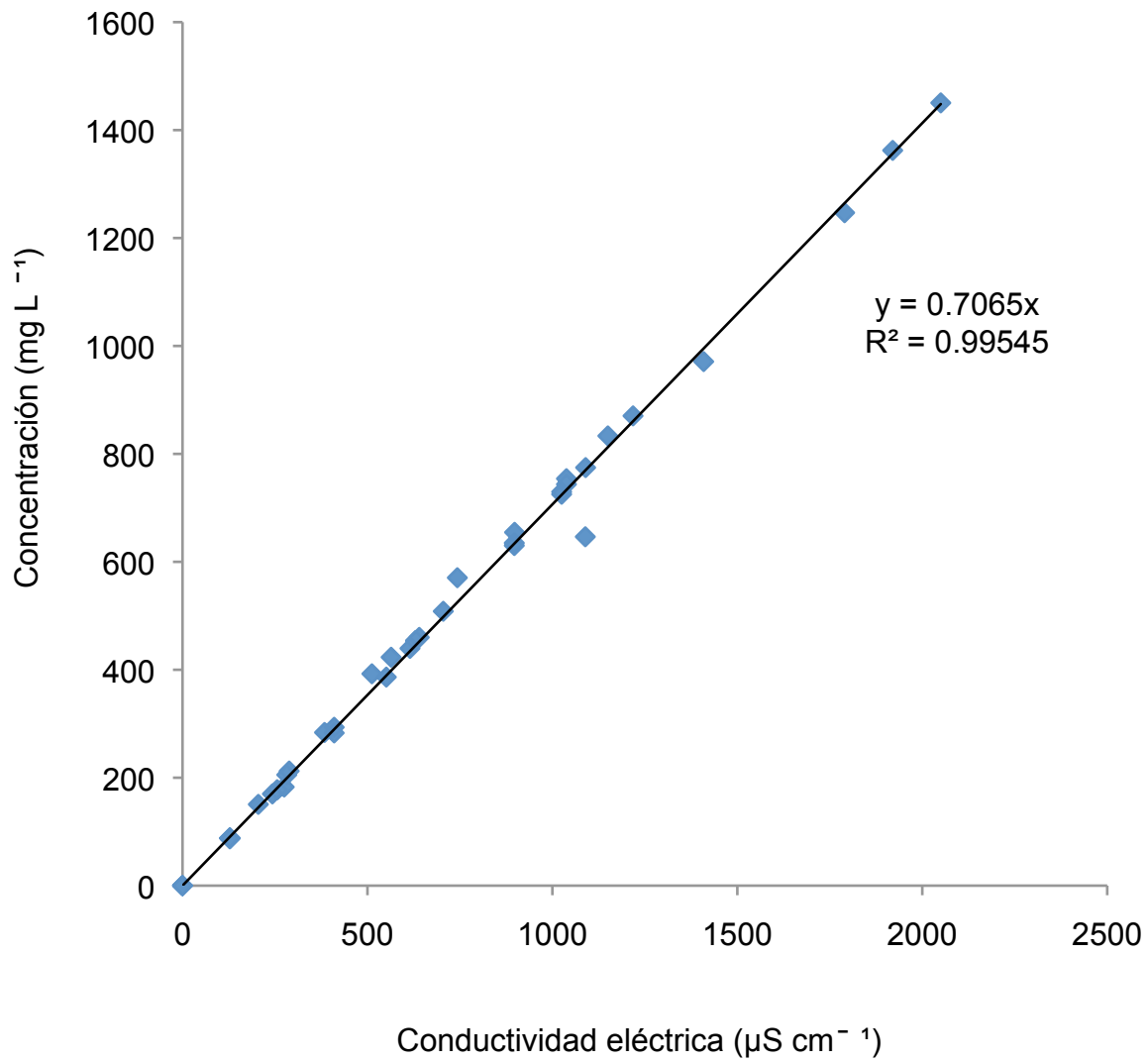


Figura 4. Relación entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y la concentración (mg L^{-1}) en las aguas de las estaciones de muestreo del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro. Estados de Hidalgo y San Luis Potosí, México. Muestreo 1. Primavera 2006.

5.2.2 MUESTREO 2 OTOÑO 2007.

En la figura 5; se presenta la relación funcional mg L^{-1} (ppm) = f_a (CE), en donde mg L^{-1} son las sales disueltas en un litro de solución expresadas en mg o ppm y la conductividad eléctrica de la solución está expresada en $\mu\text{S cm}^{-1}$. Esta figura corresponde al muestreo 2 otoño 2007. La salinidad de una agua determinada corresponde a la concentración de las sales minerales en las aguas de riego o en las soluciones de los suelos. Los iones principales en las aguas son los iones de los minerales sales. Estos iones son: Ca, Mg, Na, K, CO_3 , HCO_3 , Cl, SO_4 , aunque también se encuentran en las soluciones de las aguas superficiales y subterráneas, algunos constituyentes adicionales pero en muy pequeñas concentraciones como: B, Sr, Li, SiO_2 , Rb, F, Mo, Ba, y Al.

Los parámetros conductividad eléctrica CE y mg L^{-1} , son muy importantes para estimar aproximadamente de manera cuantitativa, la concentración total de sales disueltas en las aguas de riego.

En los trabajos de diagnóstico y clasificación de las aguas superficiales y subterráneas para riego, la concentración total de las sales solubles se ha estimado en términos de conductividad eléctrica.

En la relación funcional $\text{mg L}^{-1} = f_a$ (CE), se tiene la constante (a). La constante (a) depende de los tipos de salinidad. En el muestreo 2 de Otoño 2007 el coeficiente (a) = 0.662. Los valores de (a) corresponden a soluciones de tipo bicarbonatado con algunas cantidades de calcio y de magnesio. Las aguas del Valle del Mezquital son del tipo bicarbonatados-sódicas y las aguas que circulan por el cauce Río Moctezuma-Río Claro, estas aguas son cálcico-magnésico-bicarbonatadas.

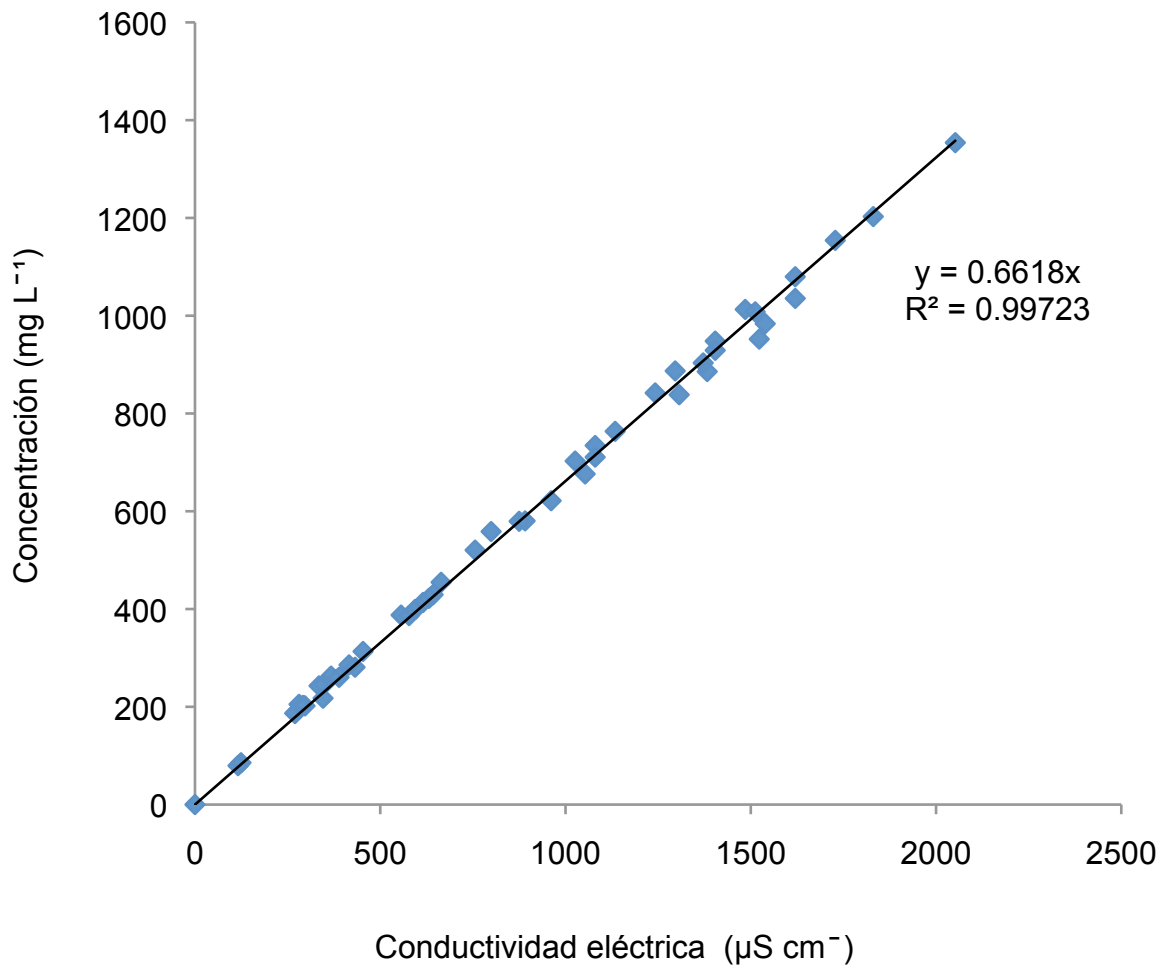


Figura 5. Relación entre la concentración de sólidos totales (mg L^{-1}) y la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) en las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, Estados de Hidalgo y San Luis Potosí. México. Muestreo 2. Otoño 2007.

5.3 CONCENTRACIONES DE CATIONES EN LAS MUESTRAS DE AGUA mmolc L⁻¹.

5.3.1 MUESTREO 1 PRIMAVERA 2006.

En la figura 6; se presenta la dependencia de concentración de cationes, expresadas en mmolc L⁻¹, con respecto a la conductividad eléctrica, expresada en mS cm⁻¹. Esta relación funcional se expresa como sigue $CC=fa (CE)$. En el caso de concentraciones de cationes de las aguas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, el valor del coeficiente (a) fue de 9.7613. En estudios que se han hecho por el laboratorio de salinidad de los Estados Unidos de América el valor del coeficiente (a) es de 10.0. El coeficiente (a) tiene variaciones para soluciones acuosas muy salinas. La dependencia de la relación funcional $CC=fa (CE)$ es rigurosamente lineal para soluciones acuosas de baja concentración.

5.3.2 MUESTREO 2 OTOÑO 2007.

En la figura 7; se presenta la dependencia de la concentración de cationes, expresada en mmolc L⁻¹, con respecto a la conductividad eléctrica expresada en mS cm⁻¹. Para el periodo de muestreo de Otoño 2007 del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, el coeficiente (a) de la relación funcional $CC= f a (CE)$ fue de 9.810

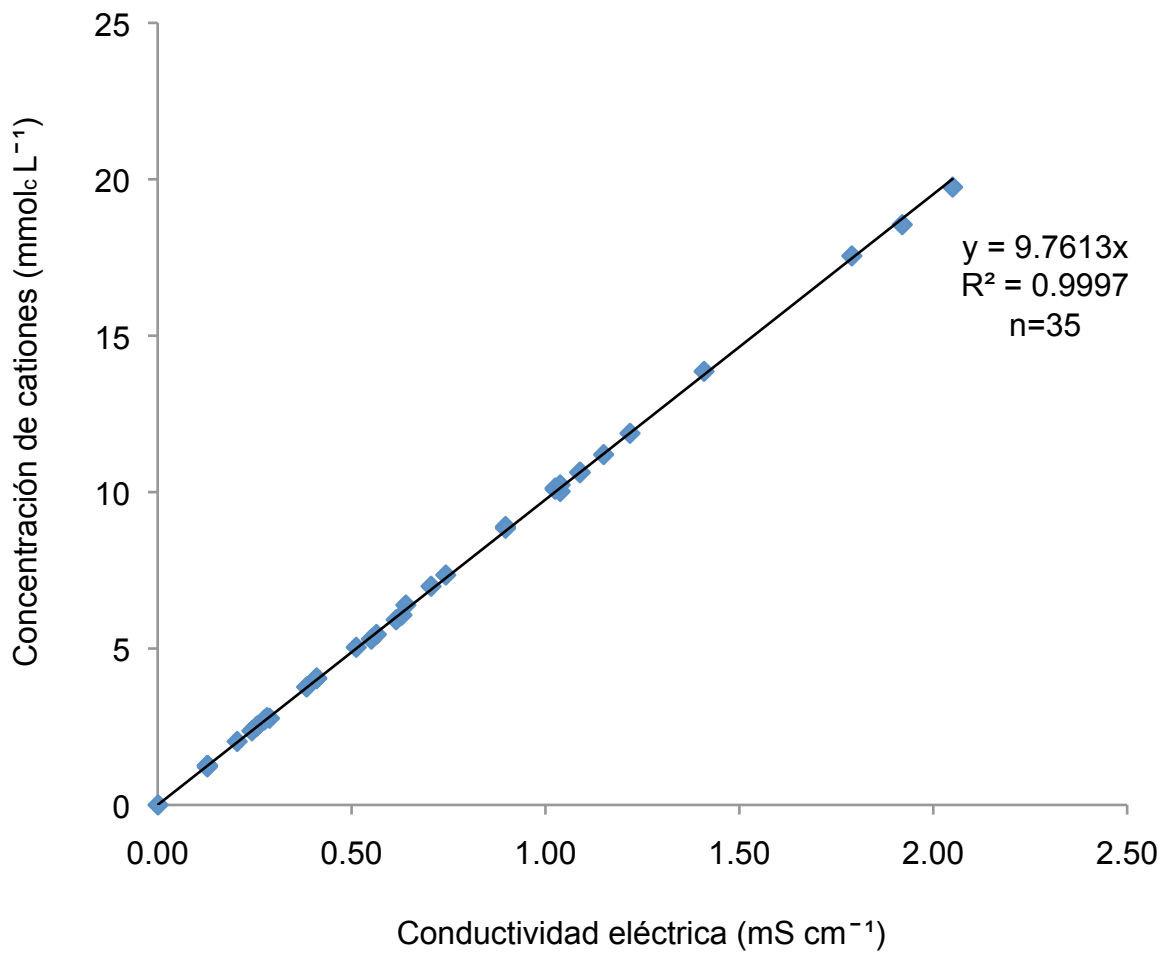


Figura 6. Relación entre la concentración de cationes (mmolc cm⁻¹) y la conductividad eléctrica (mS cm⁻¹) en las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, Estados de Hidalgo y San Luis Potosi, México Muestreo 1. Primavera 2006.

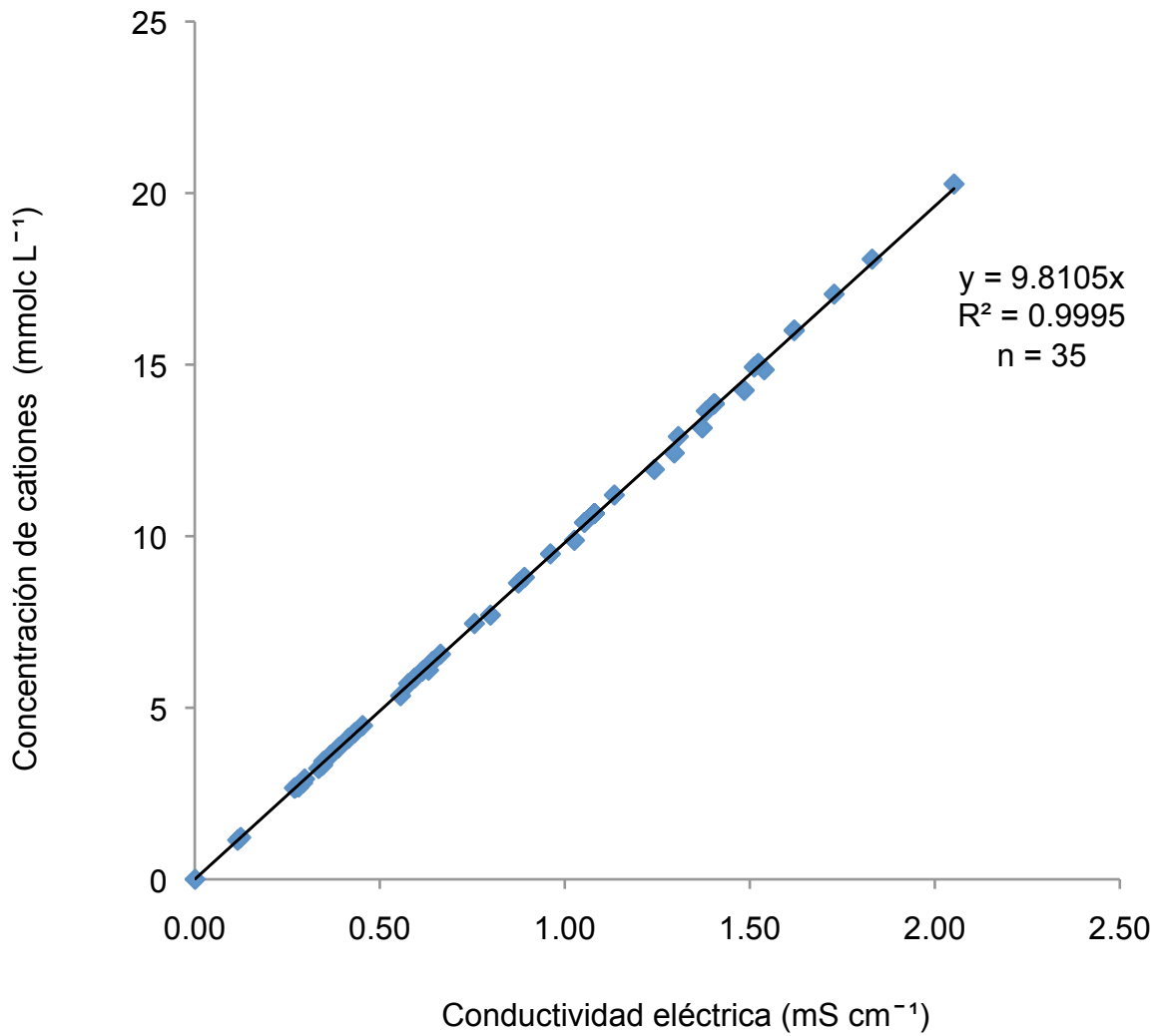


Figura 7. Relación entre la concentración de cationes (mmolc cm⁻¹) y la conductividad eléctrica (mS cm⁻¹) en las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, Estados de Hidalgo y San Luis Potosi, México Muestreo 2. Otoño 2007.

5.4 CONCENTRACIÓN DE ANIONES EN LAS MUESTRAS DE AGUA mmolc L^{-1}

5.4.1 MUESTREO 1 PRIMAVERA 2006.

En la figura 8; se presenta la dependencia de la concentración de aniones expresada en mmolc L^{-1} , y la conductividad eléctrica expresada en mS cm^{-1} . Esta relación funcional se expresa como sigue: $CA=fa (CE)$.

Los contenidos de sales solubles en las aguas se pueden expresar con un conjunto de parámetros como por ejemplo: a. La conductividad eléctrica (CE) que es un parámetro de intensidad; b. Total de sólidos disueltos TSD que es un parámetro de extensión y que se mide en mg L^{-1} , ó c. Mediante la concentración de cationes solubles (CCS) y d. Mediante la concentración de aniones solubles (CAS) que se expresan en mmolc L^{-1} .

El coeficiente de relación funcional $CA=fa (CE)$ en las determinaciones analíticas del muestreo 1 Primavera 2006 fue de $a=9.7711$.

5.4.2 MUESTREO 2 OTOÑO 2007.

En la figura 9; se presenta la dependencia de la concentración de aniones, expresada en mmolc L^{-1} , con respecto a la conductividad eléctrica, expresada en $\mu\text{S cm}^{-1}$.

El valor del coeficiente (a) de la relación funcional $CA= fa (CE)$ para éste muestreo fue de 9.683. Los valores de los coeficientes (a) del muestreo 1 Primavera 2006 y del muestreo 2 Otoño 2007 indican que las determinaciones analíticas se llevaron a cabo con suficiente exactitud. El laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos establece que para el caso de la determinación analítica de soluciones acuosas el valor del coeficiente de la relación funcional Concentración de cationes o de aniones= $f a(CE)$, el valor de (a) es de 9-10-11. El valor de (a) depende de los tipos de sales solubles en las soluciones acuosas.

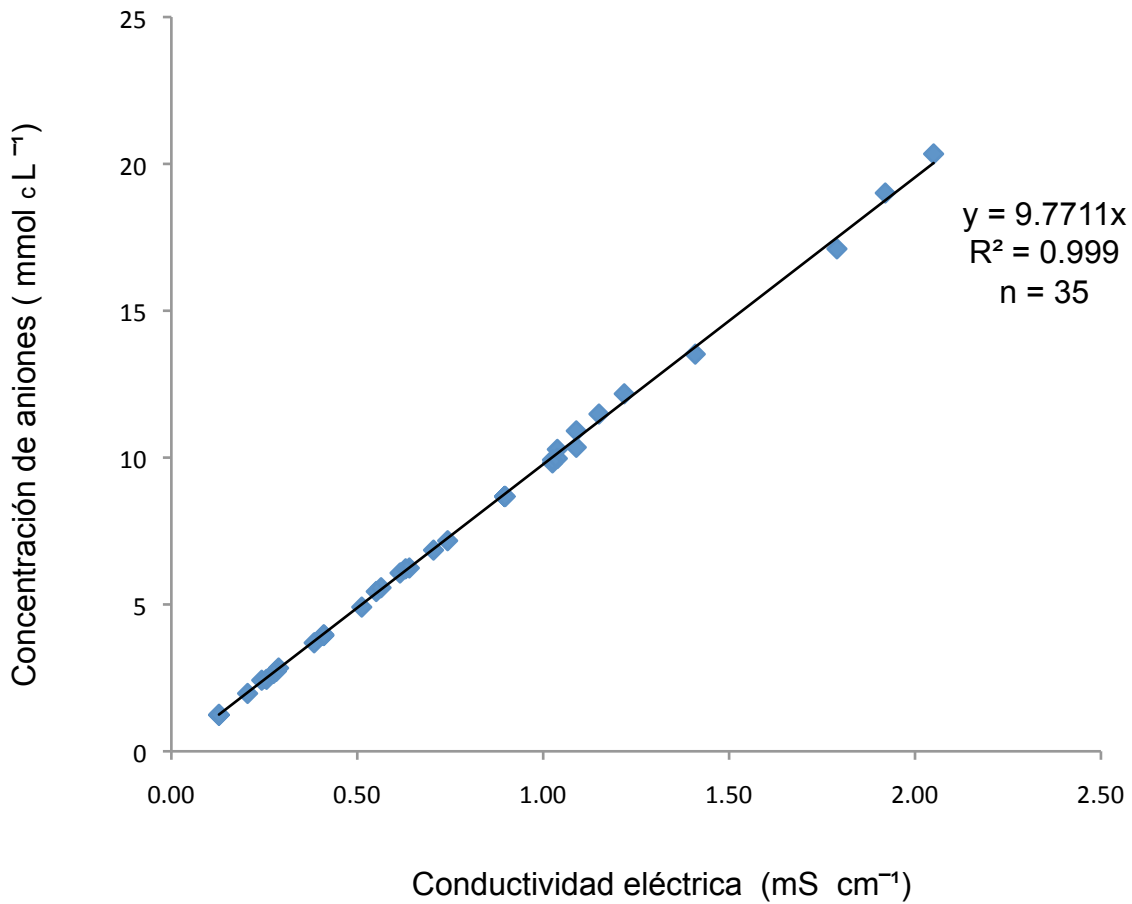


Figura 8. Relación entre la concentración de aniones (mmol c L⁻¹) y la conductividad eléctrica (mS cm⁻¹) de las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, Estados de Hidalgo y San Luis Potosi, México Muestreo 1. Primavera 2006.

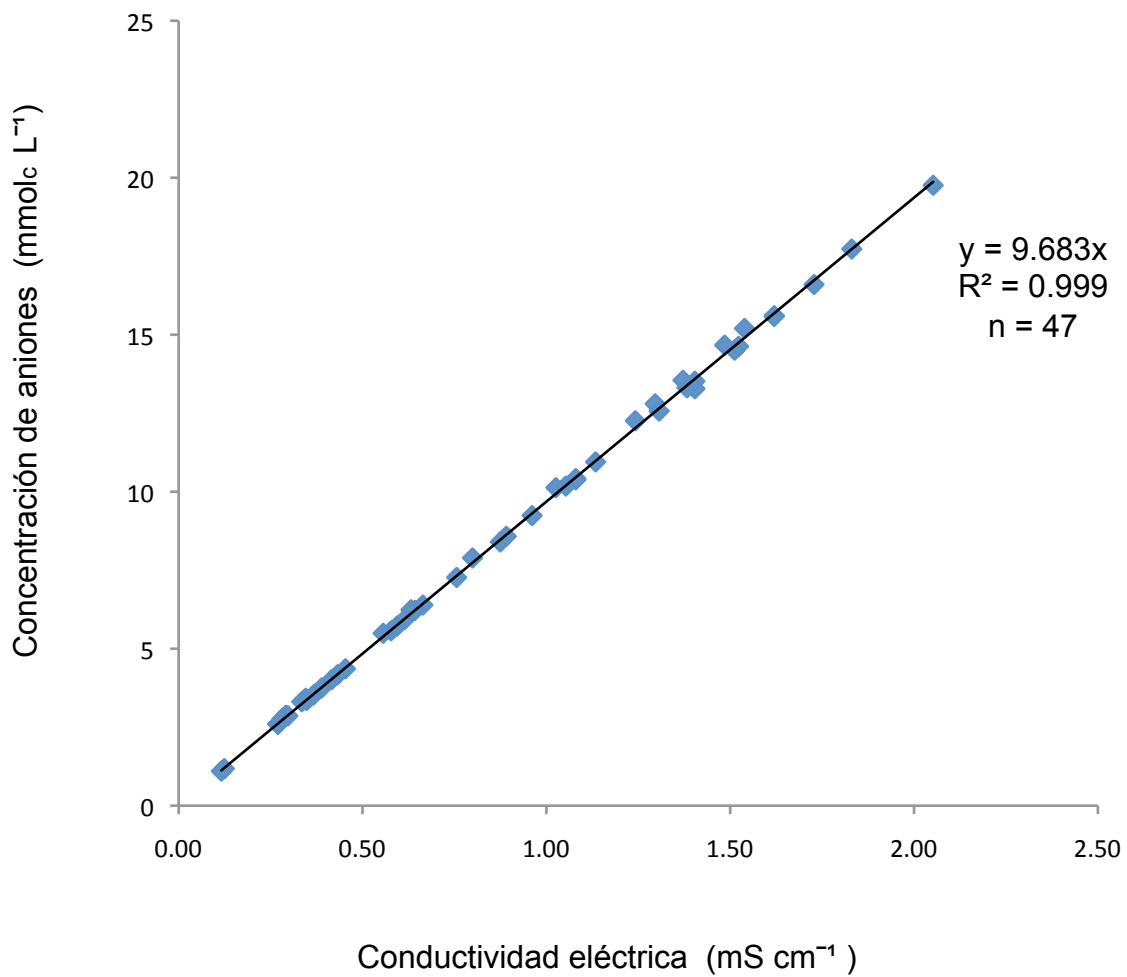


Figura 9. Relación entre la concentración de aniones (mmolc L⁻¹) y la conductividad eléctrica (mS cm⁻¹) de las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, Estados de Hidalgo y San Luis Potosi, México Muestreo 2. Otoño 2007

5.5 DEPENDENCIA DE LA PRESIÓN OSMÓTICA CON RESPECTO A LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA. PRESIÓN OSMÓTICA (MPa).

5.5.1 MUESTREO 1 PRIMAVERA 2006.

En la figura 10; se presenta la relación presión osmótica-conductividad eléctrica ó sea $PO=f(CE)$, en donde la Presión Osmótica está expresada en MPa y la conductividad eléctrica esta expresada en $mS\ cm^{-1}$.

La presión Osmótica es una de las propiedades coligativas de las soluciones salinas acuosas. Las propiedades coligativas de las soluciones electrolíticas son: 1. Disminución de vapor, 2. El aumento del punto de ebullición. 3. La disminución del punto de congelación y 4. La presión osmótica. Las propiedades coligativas de las soluciones, dependen únicamente del número de moles del soluto, que estén presentes en una cantidad dada de disolvente. La naturaleza individual del soluto no causa ninguna diferencia, mientras su acción sea ideal. Como el número de moléculas del soluto presentes es igual al número de moles multiplicado por el número de Avogadro, entonces podemos decir, que estas propiedades coligativas se deben al número de partículas de soluto presentes en una cantidad dada de disolvente.

La relación entre la presión osmótica PO y la conductividad eléctrica CE es muy útil en la práctica agrícola. Dentro de la variación de valores de la conductividad eléctrica CE que permiten el desarrollo de las plantas, la relación $PO=0.36\ CE$ puede usarse de manera muy aproximada para estimar la presión osmótica de las soluciones de los suelos, cuando se conoce la conductividad eléctrica. Para salinidades de tipo sulfáticas o con participación de sulfatos, el coeficiente (0.36) tiene variaciones. En el caso de las aguas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro el coeficiente de la relación funcional $PO=f_a(CE)$ tuvo un valor de 0.04198 cuando la Presión Osmótica se mide en MPa o de 0.4198 cuando la Presión Osmótica se mide en kPa.

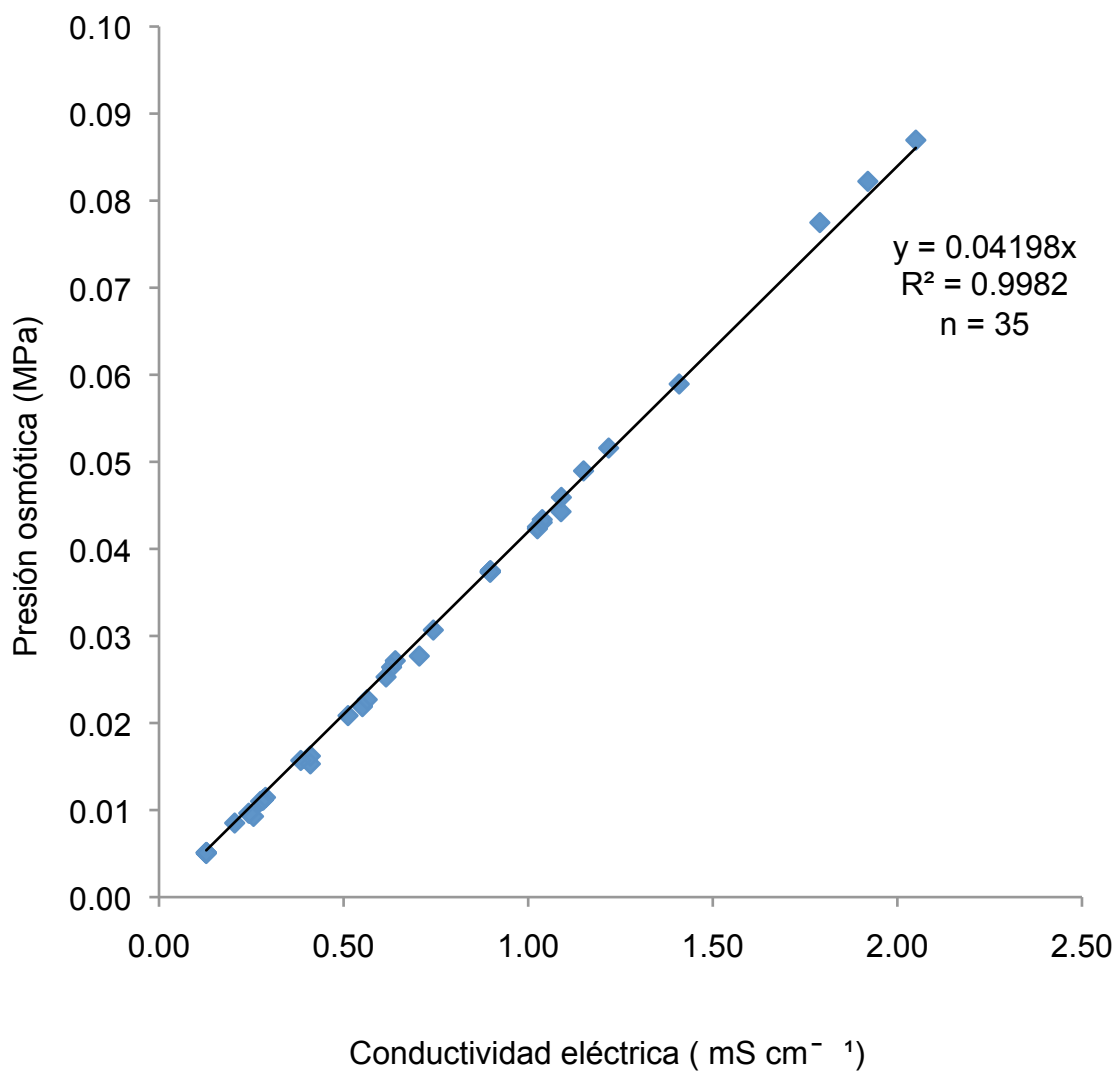


Figura 10 . Relación entre la conductividad eléctrica (mS cm⁻¹) y la presión osmótica (MPa) de las estaciones de muestreo del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro. Estados de Hidalgo y San Luis Potosi, México. Muestreo 1 . Primavera 2006.

5.5.2 MUESTREO 2 OTOÑO 2007

En la figura 11; se presenta la relación funcional $PO=fa$ (CE) que corresponde a la determinación de la presión osmótica expresada en MPa con respecto a la conductividad eléctrica, expresada en $\mu S\ cm^{-1}$.

En ésta figura 11; se puede observar que cuando las muestras de agua contienen considerables cantidades de sulfatos, como lo son las muestras de agua, que corresponden a las aguas que afluyen hacia el Río Claro y afluentes de tramo del cauce Río Moctezuma-Río Claro, derivados de la sierra madre oriental y estribaciones de lomeríos de calizas, es de esperarse entonces, que estas soluciones acuosas provean cantidades sustanciales de iones de calcio, de magnesio y de sulfatos, ya que las aguas que escurren de la sierra madre oriental atraviesan diferentes espesores de calizas con diferente cristalización y distintos espesores sedimentarios de yeso mezclados con calizas. El valor del coeficiente (a) en la Relación funcional $PO= fa$ (CE) para el muestreo 2 Otoño 2007 fue de (a)=0.0366 cuando la presión osmótica se expresa en MPa ó de (a)=0.366 cuando la presión osmótica se expresa en kPa.

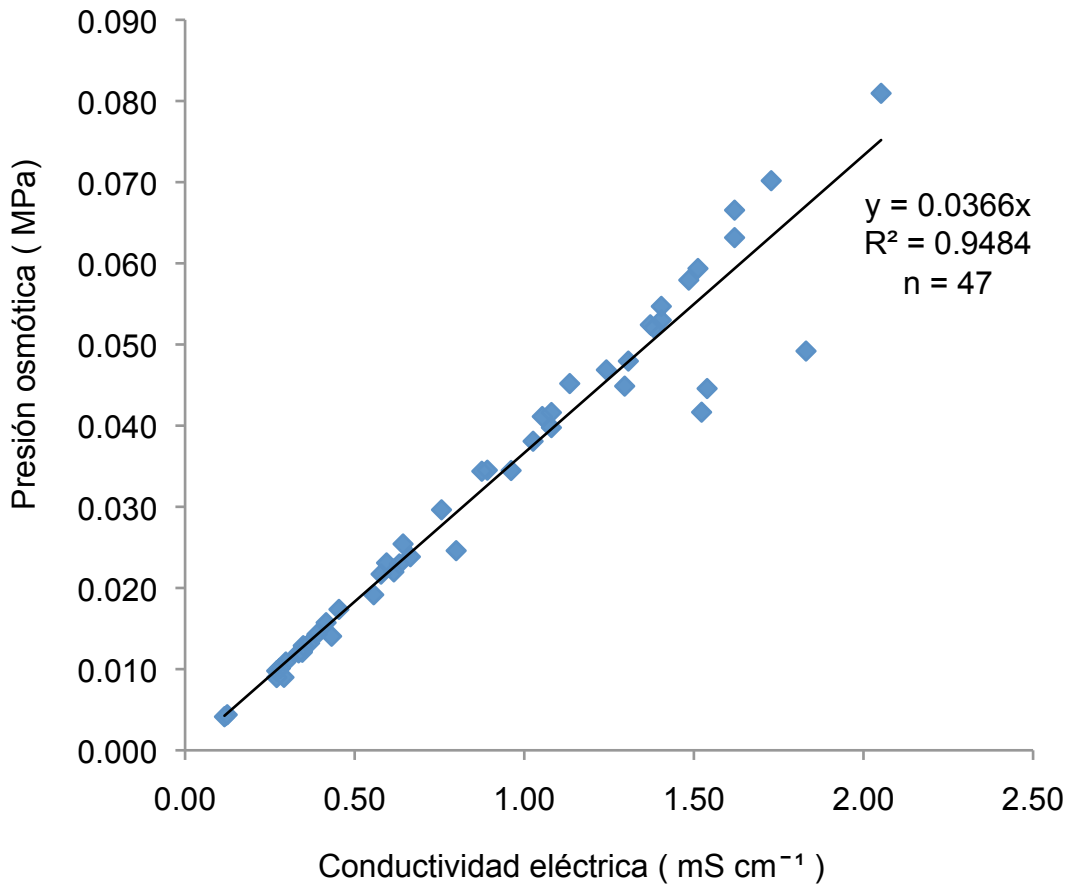


Figura11. Relación entre la concentración y la presión osmótica de las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, Estados de Hidalgo y San Luis Potosi, México. Muestreo 2. Otoño 2007.

5.6. LA RELACIÓN DE ADSORCIÓN DE SODIO.

Consideraciones teóricas. En general, el riego de los diferentes cultivos agrícolas se realiza con aguas de diferente calidad; y debido a las distintas pérdidas por conducción, ya que en la mayoría de los casos el riego se hace utilizando canales de tierra, y también a su vez debido a los excesos de las láminas de riego que se proporcionan a los cultivos para satisfacer sus requerimientos de humedad, todo esto ha provocado que conjuntamente se presenten en los suelos agrícolas bajo riego una elevación de los niveles freáticos más allá de los límites de los que se consideran críticos para ciertos cultivos, y por lo tanto, esto provoca que en los suelos se desarrolle una salinización secundaria. A ésta salinización de los suelos se le denomina salinización secundaria, y ésta se debe a la elevación de los mantos freáticos, y a una distribución tanto horizontal como vertical de las sales primarias o naturales que se encuentran inicialmente en los distintos espesores de los suelos (Szabolcs, 1989).

Entre las propiedades físicas de los suelo que se afectan, cuando estos se riegan con aguas de diferente composición química y de distinto RAS se encuentran; la porosidad, la conductividad hidráulica y la velocidad de infiltración.

El peligro de sodicidad de los suelos que se riegan con aguas con altos contenidos de sodio, afecta a los cultivos agrícolas. Los altos contenidos de sodio en las soluciones de los suelos, afecta la permeabilidad de estos suelos. Cuando se presenta una notable reducción de la infiltración del agua en el suelo, esto se puede atribuir a una formación de costras superficiales de los suelos, a una dispersión y migración de las arcillas dentro de los poros de los suelos y también a un hinchamiento de las arcillas expandibles, fundamentalmente a las arcillas montmorilloníticas.

En un medio suelo-agua, el movimiento del agua se ve afectado por la interacción que ocurre entre el suelo y el agua, debido a los procesos de intercambio catiónico; ya que el agua de riego al ser una solución electrolítica, cuyos constituyentes deben actuar con las diferentes fracciones texturales, principalmente con la fracción arcillosa, dado que es la fracción más activa debido

a su gran superficie es de suponer entonces, que se afectarán de alguna manera las propiedades físicas de los suelos, dependiendo esto del tipo de fracción arcillosa y de la calidad del agua de riego (McNeal, 1968).

La mayoría de los minerales arcillosos poseen una estructura formada por capas tetraédricas y octaédricas. A los minerales arcillosos, que tienen una capa octaédrica y una capa tetraédrica, se les denomina minerales arcillosos uno a uno, y se indican como sigue; 1:1, a éstos minerales pertenecen la caolinita y la halloisita.

Existen minerales que tienen tres capas; dos tetraédricas y una octaédrica y que se identifican como 2:1; a estos minerales se les denomina dos a uno, y entre estos minerales arcillosos está la montmorillonita y la vermiculita (McNeal y Coleman 1966). En los vertisoles de la región de Alfajayucan y de San Francisco del Valle del Mezquital se tienen minerales arcillosos del tipo montmorillonítico.

La adsorción de cationes ocurre en el complejo de intercambio catiónico que está formado de coloides minerales, orgánicos y orgánico-minerales. El tipo y la calidad de los cationes adsorbidos influyen de forma importante en las propiedades físicas y químicas de los suelos, por ejemplo el Ca^{+2} y el Na^{+} , tienen una influencia directa en la estructura de los suelos. De éste modo, el Ca^{+2} , al ser un buen coagulante favorece como consecuencia de esto, la formación de flóculos, permitiendo que el suelo tenga una estructura granulada, bien desarrollada y estable; en cambio el ion sodio dispersa las partículas coloidales de los suelos (cuadro 13).

El proceso mediante el cual las partículas del suelo se transforman en unidades independientes se le conoce como dispersión (McNeal, 1968); se ha demostrado que cuando la doble capa difusa se encuentra saturada con cationes divalentes, es más comprimida, que cuando está con cationes monovalentes; esto explica el mecanismo floculante de los cationes divalentes, pues sirven como puente de unión entre partículas (Gorbunov, 1967).

Por ejemplo, al analizar la dispersión, (cuadro 13) cuando el complejo de intercambio catiónico está saturado con un solo tipo de catión, se observará que el suelo saturado con sodio (Na), se dispersa o se disemina más que el suelo que está saturado con potasio (K), y este suelo se esparcirá más que el suelo saturado

Cuadro 13. Influencia de los cationes adsorbidos en las diferentes propiedades físicas de los suelos (Gorbunov, 1967, citado por Ortega, 1993).

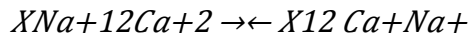
	Propiedad de los suelos	Actividad Relativa
1	Dispersión	Na>K>Mg>Ca>Al
2	Máxima higroscopicidad	Na>K>Mg>Ca>Al
3	Velocidad de infiltración	Na<K<Mg<Ca<Al
4	Ascensión capilar	Na>K>Mg>Ca>Al
5	Plasticidad	Na>K>Mg>Ca>Al
6	Resistencia de los agregados	Na<K<Mg<Ca<Al
7	Reacción de la solución del suelo pH	Na>K>Mg>Ca>Al
8	Hinchamiento	Na>K>Mg>Ca>Al
9	Velocidad de absorción del agua	Na<K<Mg<Ca<Al
10	Adherencia	Na>K>Mg>Ca>Al
11	Disociación de coloides	Na>K>Mg>Ca>Al
12	Compresibilidad cuando se tiene deshidratación	Na>K>Mg>Ca>Al

con magnesio (Mg) y así sucesivamente. De ésta misma manera se comporta la ascensión capilar, la compresibilidad cuando hay deshidratación, la plasticidad, el hinchamiento, la adherencia, etc, etc. En dirección contraria cambia la velocidad de infiltración, la velocidad de absorción, etc, etc.

Es conocido que los suelos sódicos poseen propiedades físicas adversas para el desarrollo de los cultivos: estructura poco resistente al agua, gran dureza cuando se secan o se deshidratan y alta plasticidad cuando se humedecen, así mismo, la filtración del agua y el paso del aire se dificultan. La destrucción de la estructura de los suelos se debe en gran parte, al grado con que el suelo está saturado con el ión sodio (Na), en el complejo de intercambio catiónico. El parámetro Relación Adsorción de Sodio se deriva de la reacción de intercambio catiónico de acuerdo

con la ley de acción de masas (Gapón, E.N, en Richard., 1973; Velázquez, *et. al.*, 2002).

La ecuación de intercambio catiónico en los suelos se presenta como sigue:



En donde:

X-Representa el complejo de intercambio catiónico, y las concentraciones iónicas de los iones de sodio Na^+ y de los iones de calcio Ca^{+2} de la solución del suelo están expresadas en $mmol L^{-1}$. Las fracciones adsorbidas de sodio XNa y de calcio $1/2 XCa$ están expresadas en $mmol_c 100 g^{-1}$ de suelo.

Esta ecuación se puede expresar como sigue:

$$XNaXCa = KgNa+Ca+2$$

Donde:

Kg - Es el coeficiente de selectividad iónica de Gapón y es una constante de intercambio catiónico en los suelos, que debe ser determinada para cada suelo de manera experimental.

XNa y XCa - Expresan las fracciones adsorbidas de sodio y de calcio. Agregando al ión magnesio Mg^{+2} y expresando la concentración en $mmol_c L^{-1}$ se obtiene la expresión siguiente:

$$XNaXca + XMg = Kg Na+Ca+2 + Mg+2$$

A la parte izquierda de esta ecuación se le conoce como la Relación de Adsorción de Sodio Intercambiable (RSI). A la parte del lado derecho se le conoce como

Relación de Adsorción de Sodio o (RAS). Este es el índice de clasificación de las aguas de Riego de acuerdo con el parámetro (RAS).

Si se conoce la RAS de una solución acuosa determinada; o de aguas residuales y de aguas mezcladas en particular, y conociendo la constante de selectividad de Gapón Kg, para cada suelo, entonces se puede calcular el valor del Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) de la siguiente manera: Partiendo de las siguientes definiciones:

$$RSI = SICIC - SI \quad Y \quad PSI = SICIC . 100$$

Donde:

SI- Es el sodio intercambiable, CIC – Es la capacidad de intercambio de cationes y PSI – Es el porcentaje de sodio intercambiable. Entonces se obtiene:

$$PSI = RSI1 + RSI . 100$$

La constante de selectividad iónica de Gapón Kg, depende fundamentalmente de la densidad de cargas de las partículas coloidales del suelo, y puede variar considerablemente de suelo a suelo.

Aquí en éste trabajo de investigación, sobre la clasificación de las aguas residuales y mezcladas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, se establecieron los valores de la Relación de Adsorción de Sodio, considerados como valores índice de clasificación extremos en lo que se refiere a la sodicidad de las aguas. Los valores del RAS original o explícitos de las aguas de riego; se afectan sensiblemente por la 79 parcial del ión Calcio Ca⁺², debido

fundamentalmente a que éste ión se precipita en forma de calcita (CaCO_3); y como la precipitación del Ca^{+2} depende de las concentraciones relativas de CO_3^{-2} y HCO_3^{-} en las soluciones de los suelos y de las aguas residuales y mezcladas, entonces las evaluaciones de la calidad de las aguas residuales y mezcladas de las aguas de riego, a través del índice RAS, dependerá de las cantidades de iones de calcio Ca^{+2} que parcialmente se asociarán con los iones bicarbonato y carbonato.

Las aguas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, atraviesan dos zonas diferentes. El Río Tula recibe las aguas de riego residuales del Valle del Mezquital. Estas aguas son bicarbonatado-sódicas. Y las aguas del tramo del Río Moctezuma-Río Claro reciben aguas de escurrimientos de la sierra madre oriental. Estas aguas son considerablemente ricas en sulfatos, de calcio y de magnesio. La solubilidad del sulfato de calcio es mayor que la del carbonato de calcio: $\text{CaSO}_4 > \text{CaCO}_3$. La composición química de las aguas residuales y mezcladas del tramo Río Moctezuma-Río Claro es cálcico-magnésico-bicarbonatada de baja concentración.

Con el propósito de analizar como varían las particularidades de clasificación de las aguas residuales y mezcladas cuando se utilizan diferentes formulaciones del RAS; aquí para éste efecto, se utilizaron las siguientes formulaciones del RAS:

Relación de Adsorción del Sodio (original).

$$\text{RAS} = \text{Na} + \text{Ca} + 2 + \text{Mg} + 22 \quad (\text{Gapón, citado por Richard. 1973})$$

Relación de Adsorción de Sodio (ajustado).

$$\text{RASa}_j = \text{RASa}_{j1} + (8.4 - \text{pHc}) \quad (\text{Bower y Wilcox, 1965})$$

Relación de Adsorción de Sodio (corregido).

$$\text{RAS} = \text{Na} + \text{Ca}^\circ + \text{M} \quad 80 \quad \text{z. 1981})$$

El RAS_{OR} es la determinación explícita de ésta relación, es decir, es la medición directa de esta relación sin tomar en cuenta la precipitación de los iones de calcio Ca^{+2} , debido a la presencia libre de carbonato de calcio CO_3^{2-} y de bicarbonato HCO_3^- .

El RAS_{aj} toma en cuenta la precipitación de los iones de calcio Ca^{+2} en forma de calcita CaCO_3 ; y el RAS_{coR} considera una determinada presión del CO_2 en la superficie del suelo y la Relación $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{+2}$, además de la conductividad eléctrica en las soluciones acuosas.

En distintas investigaciones se ha estado observando que los valores del índice "RAS" en las aguas de riego, cambian sustancialmente debido a que en éstas aguas se precipita el carbonato de calcio de dichas aguas. Este proceso tiene un efecto directo en los suelos, debido al peligro potencial del ión sodio durante el uso de estas aguas.

La esencia de este problema, o la importancia de éstos cambios en las soluciones acuosas, ha sido objeto de un gran número de investigaciones en los últimos años y como consecuencia de esto, se han encontrado opiniones muy variadas para evaluar el peligro del ión sodio Na^+ en las aguas de riego y especialmente en aquellas aguas que contienen concentraciones libres de carbonato y de

bicarbonato (Bower; *et. al.*, 1965).

En el caso de las aguas residuales y mezcladas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro; que durante el trayecto Río Moctezuma-Río Claro, que se localiza después de la presa de Zimapán, Edo de Hidalgo, y considerando que en éste tramo, estas aguas escurren por la sierra madre oriental, y que reciben en su cauce diferentes afluentes que provienen de fracturas de calizas y de espesores sedimentarios evaporíticos, a éste respecto se debe mencionar, que las aguas residuales y mezcladas que por el cauce del Río Tula ya recibieron aguas excedentes y de drenaje de las distintas áreas bajo riego del Valle del Mezquital y que siendo éstas aguas de una composición química bicarbonatada-sódica, por lo

que como consecuencia después de seguir su curso por el cauce del tramo del Río Moctezuma-Río Claro, se observará que éstas aguas se transforman en aguas cálcico-magnésicas-bicarbonatadas en la estación de muestreo del Río Claro. Oviamente, en éstas condiciones, los valores de la Relación de Adsorción de Sodio disminuyen debido a las aportaciones de los iones de calcio Ca^{+2} solubilizado de las calizas y de espesores carbonatado-yesíferos de la sierra Madre Oriental. La solubilidad del sulfato de calcio es mayor que la solubilidad del carbonato de calcio.

Por último se debe señalar que diferentes valores del “índice” RAS clasifican a una agua dentro de una determinada peligrosidad del ion sodio en el diagrama de Richard, (1973); sin embargo, cuando se toman en cuenta distintas formulaciones del “índice” RAS, estas mismas aguas pueden quedar clasificadas dentro de otro grupo de peligrosidad del ion sodio ya que adquieren nuevos y distintos valores del RAS.

Diferentes valores de peligrosidad del ion sodio indican diferentes valores de sodio intercambiable en los suelos. La determinación del “índice” RAS a través de diferentes formulaciones del RAS, lleva implícito distintas fracciones de calcio precipitado en forma de calcita (CaCO_3), debido a los procesos físico-químicos que se tienen en las aguas residuales y mezcladas, tales cambios se deben a variaciones en el pH y variaciones de temperaturas diurnas y nocturnas.

5.6.1 CAMBIOS EN LA CONDUCTIVIDAD HIDRAÚLICA Y EN LA INFILTRACIÓN DE LOS SUELOS.

En los procesos de cambios de la conductividad hidráulica, comúnmente se consideran dos aspectos: el relativo al efecto de la concentración de las sales que se tienen en las aguas de riego, es decir a su concentración total electrolítica y el relativo al proceso de intercambio catiónico, es decir, en que nivel se encuentra el sodio intercambiable adsorbido en los suelos.

Thomas y Yaron (1968) han demostrado que, la conductividad hidráulica depende más notablemente de la concentración electrolítica de las aguas de riego que

de los cationes intercambiables de los suelos; aunque es importante señalar que, para efectos de recuperación de los suelos que tienen altos niveles de sodio intercambiable es conveniente considerar la constitución cualitativa de las soluciones acuosas electrolíticas.

Reeve y Tamaddoni (1965) mencionan que los trabajos de recuperación de los suelos sódicos, con frecuencia se han limitado al uso de soluciones electrolíticas cuya concentración se encuentra entre los límites de las aguas de riego ($< 50.0 \text{ mmolc L}^{-1}$), considerando la constitución cualitativa de estas aguas de riego.

McNeal *et al* (1968) condujeron a cabo estudios sobre variaciones de la conductividad hidráulica de diversos suelos en diferente composición mineralógica, y sujetos a lavados con soluciones salinas de diferentes concentración total electrolítica y distinto valor del “índice” RAS. Estos autores encontraron que la disminución de la conductividad hidráulica fue más pronunciada en los suelos ricos en arcillas montmorilloníticas.

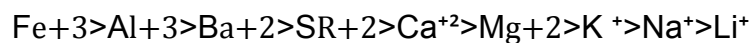
Dos son los factores responsables en la disminución de la conductividad hidráulica de los suelos, cuando éstos son lavados con aguas que tienen bajas concentraciones, por ejemplo, con concentraciones de 10 mmolc L^{-1} o menos que son concentraciones típicas de las aguas de riego. Uno de éstos factores es la disminución del espacio poroso debido a la expansión de los minerales arcillosos “in situ”, y el otro es la dispersión de las plaquillas de arcilla, que teniendo movilidad bloquean los microporos del suelo, disminuyendo con esto su conductividad hidráulica.

Mc Neal y Coleman (1966), en sus estudios sobre el efecto de la composición de una solución determinada sobre la conductividad hidráulica de los suelos, establecieron que la presencia de iones divalentes, tales como el calcio Ca^{+2} , generalmente estabilizan o aumentan la conductividad hidráulica de los suelos, mientras que la presencia de los iones de sodio Na^{+} , en la solución del suelo que percola a través de una capa de suelo determinado, o en el complejo de

intercambio catiónico, frecuentemente disminuyen la conductividad hidráulica, particularmente cuando la salinidad del agua es baja.

La capacidad coagulante del calcio Ca^{+2} , ha sido observada por diferentes autores, Gedroitz, citado por Kachinskiy (Ortega; 1976), utilizando la Regla de Shultz y Hardy, y con base en varios experimentos, hizo la siguiente formulación sobre la fuerza coagulativa de los diferentes cationes, aplicándose esto a los suelos.

La capacidad coagulativa de los cationes aumenta con la valencia de los cationes y dentro de cada grupo de valencia con su peso atómico:



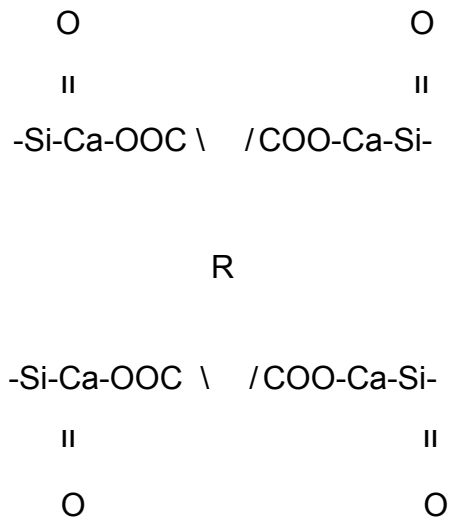
La importancia del calcio Ca^{+2} en los procesos de intercambio catiónico y estabilización de las propiedades físicas de los suelos y especialmente de la conductividad hidráulica, se ha analizado desde diferentes puntos de vista, aunque se debe hacer hincapié, que la disponibilidad de Ca^{+2} en las aguas naturales y residuales puede verse sensiblemente afectada en presencia de altas cantidades de carbonato CO_3^{2-} y de bicarbonatos HCO_3^{-} , ya que los iones de calcio Ca^{+2} se precipitan en forma de calcita CaCO_3 .

Por ésta razón, generalmente se recurre a la introducción de iones de calcio Ca^{+2} en forma de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (yeso de yacimientos naturales) en las aguas de riego, para lograr con esto, suficiente calcio Ca^{+2} disponible para los procesos de las reacciones de intercambio.

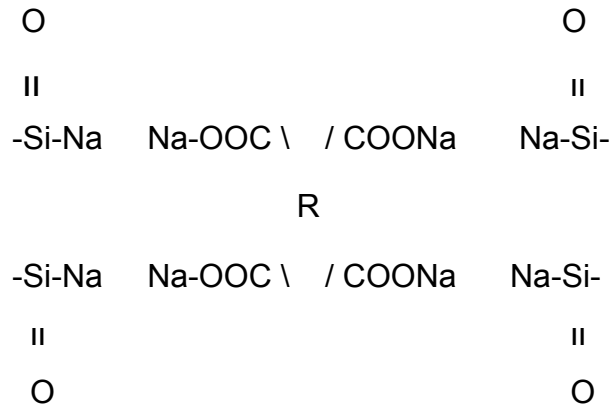
En el caso particular de las aguas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro; las aguas que escurren desde los orígenes del Río Tula y que en su primer tramo de escurrimiento estas aguas se embalsan en la Presa Taximhay, que por razones de un intemperismo inicial de los espesores sedimentarios, estas aguas son de baja concentración del tipo bicarbonatado-sódico-cálcicos, y que como consecuencia de su curso para formar el cauce del Río Tula; estas aguas que pertenecen ya al Río Tula se transforman en aguas bicarbonatado-sódicas debido

al recibimiento de las aguas residuales y mezcladas que riegan el Valle del Mezquital. Es a partir del Río Moctezuma que prácticamente inicia su cauce en las adjuntas, Edo de Hidalgo, aquí el Río Moctezuma hasta su confluencia con el Río Claro las aguas del tramo Río Moctezuma-Río Claro reciben en éste tramo considerables cantidades de iones de Calcio Ca^{+2} debido a los escurrimientos de la Sierra Madre Oriental transformándose con esto la calidad de las aguas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, es decir, las aguas se transforman del tipo sódico-bicarbonatadas a aguas de calidad altamente favorables como son las aguas cálcico-magnésico-bicarbonatadas. Efectos del ión calcio y del ión sodio en los coloides de los suelos. Los procesos de coagulación coloidal y de dispersión coloidal se ilustran mediante los esquemas siguientes (Peterson, 1947).

Coagulación coloidal (un coloide está formado por cinco partículas colídales).



Dispersión coloidal o fraccionamiento individualizado de partículas (cinco coloides independientes).



En estos esquemas de coagulación y de dispersión coloidal, se ilustra claramente el efecto del ion calcio Ca^{+2} , para mantener buenas propiedades físicas en los suelos agrícolas. Como un aspecto particularmente importante se debe señalar, que las aguas del cauce general del Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro; que siendo las aguas de éste cauce hidrográfico hasta la Presa Zimapán del tipo bicarbonatado-sódico, y que en seguida, siguiendo un curso atraviesan parcialmente la Sierra Madre Oriental y que debiéndose a que durante este trayecto reciben estas aguas considerables cantidades de iones de calcio y de magnesio, derivadas de los procesos de disolución de calcitas, dolomitas y espesores yesíferos, singularmente entonces se propicia la transformación de una calidad poco favorable para las propiedades físico-químicas de los suelos a una calidad excepcionalmente buena, ya que éstas aguas adquieren una composición cálcico-magnésico-bicarbonatada.

Problemas de infiltración. El proceso de infiltración se refiere a la facilidad con que el agua atraviesa la superficie del suelo y ésta se mide en términos de velocidad; y el termino “permeabilidad” se refiere más correctamente a la conductividad hidráulica, la cual depende de la geometría de los poros del suelo y del contenido de agua en el suelo y se utiliza para describir el flujo de aguas que ocurre dentro de la masa del suelo (Reeve y Tamaddomi, 1965).

Aquí en éste trabajo, se utilizará el término “problemas de infiltración”, para indicar el efecto de la salinidad, en relación con la facilidad con que el agua se introduce y se desplaza en los primeros centímetros del suelo. Un problema de infiltración se

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

Cuando la reducción de la infiltración se debe a la calidad del agua aplicada, el problema ocurre por lo general en los primeros centímetros del suelo, aunque ocasionalmente puede ocurrir a mayores profundidades.

Una velocidad de infiltración de 3.0 mm h^{-1} se considera baja mientras que una velocidad de infiltración por encima de 12 mm h^{-1} es relativamente alta. Además de la calidad del agua, la infiltración está determinada por las características físicas del suelo, como la textura y el tipo de minerales de arcilla, y por sus características químicas, incluyendo a los cationes intercambiables.

La dispersión de los suelos y la destrucción de su estructura, se producen únicamente cuando el contenido del ión sodio Na^+ supera al contenido del ión calcio Ca^{+2} en una proporción más allá de 3:1.

5.6.2 DISTRIBUCIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES Y MEZCLADAS EN EL DIAGRAMA DE RICHARD.

En la figura 12; se presenta como se distribuyen en diferentes grupos de peligrosidad del ión sodio, de acuerdo con su concentración, las aguas del cauce general del Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro para los muestreos: Muestreo 1 Primavera 2006, y muestreo 2 Otoño 2007; de acuerdo con el diagrama de Richard (1973) para las diferentes formulaciones de la Relación de Adsorción de Sodio o RAS.

5.6.3 MUESTREO 1. PRIMAVERA 2006.

En el cuadro 14; se presenta en porcentaje, los tipos de aguas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, Estados de Hidalgo y San Luis Potosi; de acuerdo con los valores calculados de la Relación de Adsorción de Sodio en sus diferentes formulaciones.

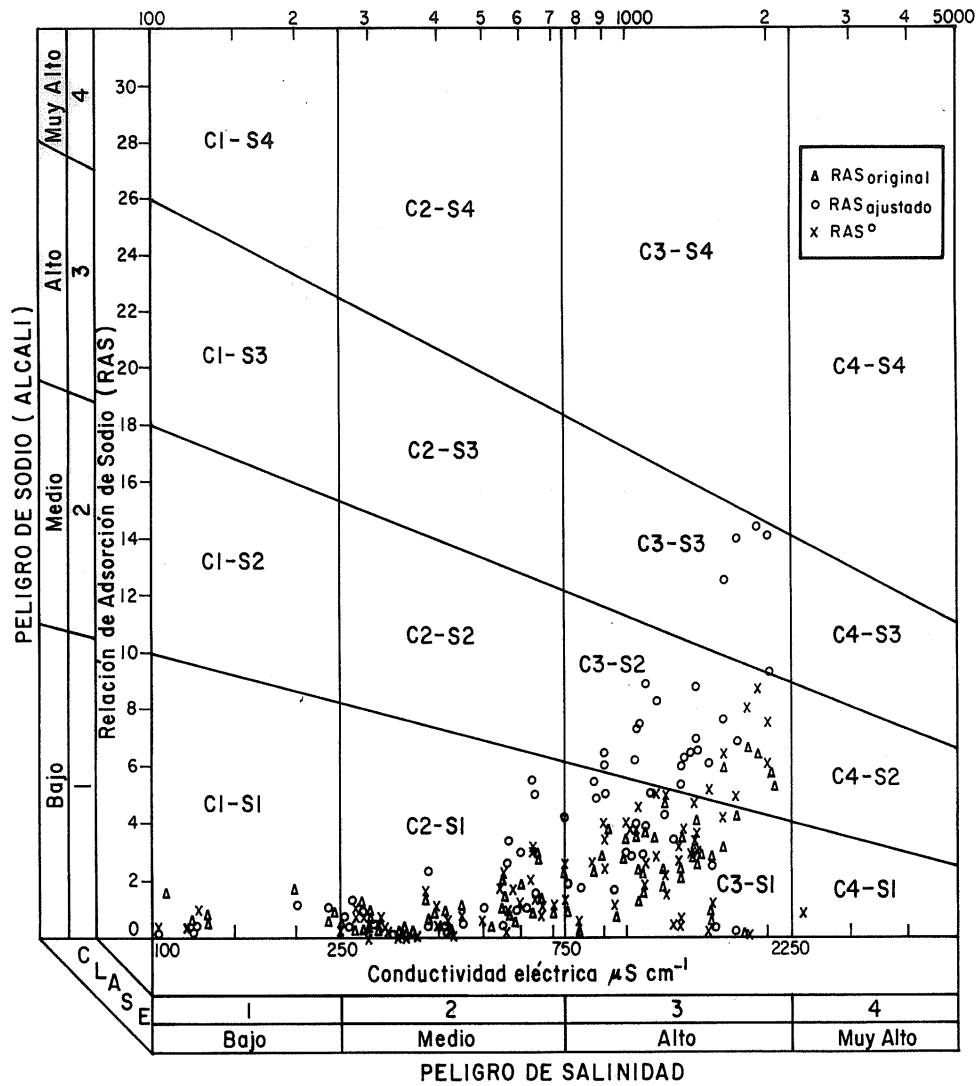


Figura 12. Diagrama de la clasificación de las aguas del cauce fluvial Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, en los estados de Hidalgo y San Luis Potosí, México RASoriginal-CE, RASajustado-CE y RAS°-CE

Cuadro 14. Distribución en grupos de las aguas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, de acuerdo con su concentración y con los valores de los diferentes RAS, expresados en porcentajes. Muestreo 1 Primavera 2006.

Tipo de agua	Relación de adsorción de sodio	%
	(Gapon, citado por Richard, 1973)	
	$RAS_{or} = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca^{+2} + Mg^{+2}}{2}}}$	
C1S1		36
C2S1		29
C3S1		35
	(Bower y Wilcox, 1965)	
	$RAS_{aj} = RAS[1 + 8.4 - pH_c]$	
C1S1		26
C2S1		29
C3S1		7
C3S2		28
C1S2		10
	(Suarez, 1981)	
	$RAS_{cor} = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca^{+2} + Mg^{+2}}{2}}}$	
C1S1		37
C2S1		28
C3S1		35

Como puede observarse, en el cuadro los valores de los diferentes RAS que se obtienen al tomar en cuenta diferentes procesos que ocurren dentro de las aguas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, a este respecto, es notable que los porcentajes de las aguas C1S1-36%, C2S1-29% y C3S1-35% cuando la medición del RAS es medido originalmente, en comparación con los valores del RAS_{cor} que se miden tomando en cuenta la relación HCO_3Ca son casi iguales. Los valores del RAS_{cor} en estas aguas son: C1S1-37%, C2S1-28% y C3S1-35%.

En cambio cuando los valores del RAS toma en cuenta potencialmente la precipitación de carbonatos CO_3^{-2} y bicarbonatos HCO_3^- libres en las soluciones de las aguas; los valores del RAS_{aj} son los siguientes: C1S1-26%, C2S1-29%,

C3S1-7%, C3S2-29% y C1S2-10%. Aquí en las mediciones del RAS_{aj} las aguas cambian, en lo que se refiere a su peligrosidad debido a altos contenidos de sodio en un número considerable de muestras de agua, en particular, aparecen los siguientes tipos de aguas: C3S2-28% y C1S2-10%, un 38% de las aguas residuales y mezcladas presenta valores altos de peligrosidad debido a los iones de sodio.

Las aguas clasificadas, de acuerdo con el diagrama de Richard 1973, C1S1, C2S1, C3S1, que corresponden al cálculo del RAS_{or} o explícito, considerando su concentración se pueden utilizar en el riego de cultivos moderadamente tolerantes a las sales. Por lo que se refiere a la peligrosidad del ión sodio, los valores de RAS < 10. Y por lo que concierne a éste parámetro, estas aguas pueden utilizarse para el riego en la mayoría de los suelos con pocas probabilidades de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. Sin embargo, los cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

Cuando las aguas del muestreo 1 Primavera 2006, se evaluaron de acuerdo con el RAS_{aj}, aparecen en el diagrama de Richard (1973) aguas con una mayor peligrosidad del ión sodio, en particular, con una peligrosidad de sodio de (S2). Las aguas clasificadas con (S2) son aguas medias en sodio. El RAS de estas aguas es de 10-18. El uso de estas aguas, en suelos de textura fina, el ión sodio representa un peligro considerable.

En el caso de que las aguas se evalúen con el RAS_{cor} la distribución de las aguas del muestreo 1 Primavera 2006, las diferentes aguas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro prácticamente quedan clasificadas en el diagrama de Richard (1973) como en el caso de la clasificación de las aguas utilizando el RAS_{or}.

5.6.4 MUESTREO 2. OTOÑO 2007.

En el cuadro 15; se presenta la clasificación de las aguas residuales y mezcladas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro del muestreo 2 otoño 2007; de acuerdo con el parámetro Relación de Adsorción de Sodio en sus diferentes formulaciones:

Cuadro 15. Distribución en grupos de las aguas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, de acuerdo con su concentración y con los valores de los diferentes RAS, expresados en porcentajes. Muestreo 2 Otoño 2007.

Tipo de agua	Relación de adsorción de sodio	%
	(Gapon, citado por Richard, 1973)	
	$RAS_{or} = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca^{+2} + Mg^{+2}}{2}}}$	
C1S1		4
C2S1		42
C3S1		52
C3S2		2
	(Bower y Wilcox, 1965)	
	$RAS_{aj} = RAS[1 + 8.4 - pH_c]$	
C1S1		4
C2S1		42
C3S1		35
C3S2		17
C3S3		2
	(Suarez, 1981)	
	$RAS_{cor} = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca^{+2} + Mg^{+2}}{2}}}$	
C1S1		4
C2S1		42
C3S1		48
C3S2		6

En el cuadro 15 se observa, como quedan clasificadas las muestras de agua del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, cuando se hacen mediciones del parámetro RAS_{OR} , que son las siguientes: C1-S1 4 %, C2S1-42, C3S1-52 y C3S2-2%, y cuando estas mediciones del RAS_{OR} se comparan con el RAS_{COR} los diferentes tipos de agua en caso de que éstas se clasifiquen de acuerdo al RAS_{OR} , casi no existen variaciones en lo que concierne a las modificaciones en la peligrosidad del ión sodio. Esta es la clasificación de los tipos de agua cuando se evalúan el RAS_{COR} : C1S1-4%, C2S1-42, C3S1-48 y C3S2-6%.

Sin embargo, cuando se evalúan las muestras de agua del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro con el parámetro RAS_{aj} ; aquí en éste caso sí se presentan variaciones en lo que respecta a la peligrosidad del ión sodio. En éste caso, las aguas se clasifican cuando se evalúan de acuerdo con el parámetro RAS_{aj} como sigue: C1S1-4%, C2S1-42%, C3S1-35%, C3S2-17% y C3S3-2%. En las aguas clasificadas como C3S2-17% y C3S3-2% ya se presenta una considerable peligrosidad, en los que se refiere a los altos contenidos de sodio.

En el caso de la evaluación de las aguas residuales y mezcladas del muestreo 2 otoño 2007 del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, cuando estas aguas se evalúan de acuerdo con el RAS_{aj} , las aguas quedan clasificadas, en el diagrama de Richard (1973), en lo que se refiere a la peligrosidad del ión sodio como sigue: S1, S2 y S3.

Cuando las aguas se clasifican como S1 ($RAS < 10$); estas aguas pueden utilizarse en el riego de la mayoría de los suelos con pocas probabilidades de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. Y en el caso de que las aguas se clasifiquen con S2 ($RAS = 10-18$); el ión sodio representa un peligro considerable, cuando estas aguas, riegan suelos de textura fina.

Por último en particular, cuando las aguas, quedan clasificadas como S3 ($RAS = 18-26$) en el diagrama de Richard (1973); estas aguas pueden producir niveles altos de sodio intercambiable en la mayoría de los suelos que se riegan con éstas aguas, por lo que entonces, los suelos necesitan practicas especiales

de manejo, buen drenaje, fácil lavado e incorporación de materia orgánica. Los suelos yesíferos, pueden no desarrollar niveles perjudiciales de sodio intercambiable, cuando se riegan con este tipo de aguas.

5.6.5 DEPENDENCIA DE LA INFILTRACIÓN DE LOS SUELOS DE LA RELACIÓN RAS-CE.

La sodicidad de los suelos aumenta la dispersión y pérdida de estructura de la superficie de los suelos. Esto comúnmente se manifiesta a través de una disminución de la permeabilidad de los suelos y con un aumento del encostramiento. La pérdida de la permeabilidad puede restringir la infiltración del agua hacia la zona de raíces de las plantas. Las plantas se estresan por falta de agua. El encostramiento puede obstaculizar e impedir la emergencia de las plántulas y con esto reducir el número plantas por unidad de área.

Los suelos con sodio intercambiable son suelos que están pobremente agregados, con costras en la superficie, y compactos o comprimidos cuando están secos y pegajosos y plásticos cuando están húmedos. El color de los suelos sódicos a veces es de un color café oscuro, o negro, debido a que en la superficie se tienen capas de materia orgánica dispersa. En la figura 13; se presenta como se encuentran clasificadas, en lo que se refiere a los problemas de infiltración, las muestras de agua del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro, en el esquema RAS-CE para los muestreos: Muestreo 1 Primavera 2006 y Muestreo 2 Otoño 2007.

Como se puede observar en la figura 13 un gran porcentaje de las aguas no tienen problemas de infiltración. En cambio alrededor de un 5-6% de las aguas presenta una reducción de la infiltración ligera o moderada.

5.7 INDICES DE CLASIFICACIÓN: SALINIDAD EFECTIVA (SE), SALINIDAD POTENCIAL (SP) Y CARBONATO DE SODIO RESIDUAL (CSR).

En los comienzos de los estudios sobre la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, además de lagos y lagunas, que se utilizan para satisfacer las necesidades de riego de los cultivos agrícolas, se observó experimentalmente que

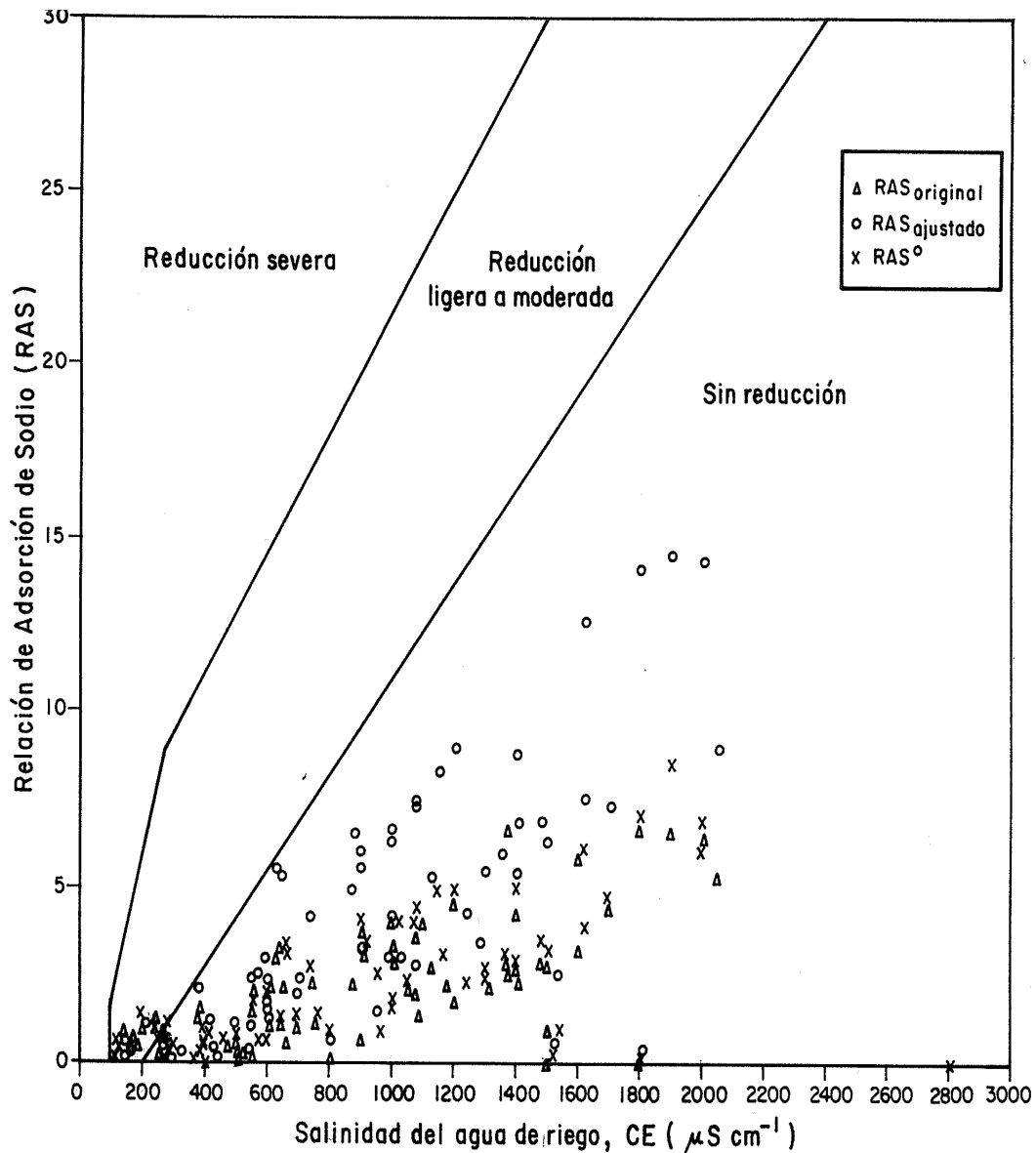


Figura 13. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio, de las aguas del cauce general RíoTula-Río Moctezuma-Río Claro, en los estados de Hidalgo y San Luis Potosí, México.

los diferentes tipos de aguas se infiltraban de manera muy diferente en los distintos suelos agrícolas bajo riego, y como consecuencia de éstas observaciones, se determinó que las variadas composiciones químicas de estas aguas afectaban de manera diferente las propiedades físicas de los suelos. Por lo que en ese tiempo se mencionaba que “aguas duras hace suelos blandos y que aguas blandas hace suelos duros”.

Hoy se sabe que las llamadas “aguas blandas”, ricas en bicarbonato de sodio propician considerablemente la acumulación de sodio intercambiable en los suelos agrícolas.

Uno de los procedimientos que se han utilizado en el pasado reciente para determinar los posibles problemas de infiltración fue el método de carbonato de sodio residual (CSR) (Eaton, 1950).

También en su tiempo se propusieron el “índice” salinidad efectiva (SE) y el “índice” salinidad potencial (SP), para determinar el efecto de las sales solubles sobre los cultivos agrícolas. Aquí el efecto de las sales solubles sobre los suelos y plantas se considera a través de la concentración total.

En los cuadros 16 y 17; se presentan los valores de los siguientes índices: salinidad efectiva (SE), salinidad potencial (SP) y carbonato de sodio residual (CSR); obtenidas de las determinaciones analíticas de las muestras de agua del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro de las estaciones de muestreo: Muestreo 1 Primavera 2006 y Muestreo 2 Otoño 2007.

Los porcentajes de aguas buenas, condicionales o no recomendables fueron las siguientes:

5.7.1 MUESTREO 1 PRIMAVERA 2006.

Por lo que se refiere al “índice” salinidad efectiva (SE) el porcentaje de aguas de buena calidad fue de 49%. De acuerdo con éste “índice” el 51% fue clasificado como aguas condicionadas.

Cuadro 16. Valores de la salinidad efectiva y de la salinidad potencial en las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro. Estados de Hidalgo y San Luis Potosí. México, Muestreo 1 Primavera 2006.

No	Salinidad efectiva	Clasificación	Salinidad potencial	Clasificación	Na ₂ CO ₃ Residual	Clasificación
1	2.08	B	1.52	B	-4.91	B
2	0.56	B	0.45	B	-0.70	B
3	0.54	B	0.45	B	-0.68	B
4	3.50	C	0.45	B	-3.85	B
5	1.49	B	1.35	B	-2.70	B
6	1.38	B	1.21	B	-1.55	B
7	0.61	B	0.49	B	-0.70	B
8	1.20	B	0.43	B	-0.83	B
9	1.06	B	0.91	B	-1.32	B
10	2.65	B	1.04	B	-2.80	B
11	2.36	B	1.96	B	-2.94	B
12	2.62	B	1.85	B	-3.30	B
13	5.00	C	2.24	B	-3.90	B
14	5.03	C	3.28	C	-3.83	B
15	5.73	C	2.90	B	-4.50	B
16	5.57	C	3.05	C	-4.45	B
17	6.32	C	3.47	C	-4.30	B
18	5.54	C	3.00	C	-4.55	B
19	5.48	C	3.39	C	-4.65	B
20	12.05	C	6.52	C	-5.50	B
21	12.75	C	7.95	C	-7.00	B
22	12.30	C	7.62	C	-6.25	B
23	6.70	C	3.98	C	-4.50	B
24	3.84	C	2.00	B	-2.55	B
25	3.57	C	1.87	B	-2.50	B
26	6.02	C	4.23	C	-4.62	B
27	7.96	C	5.40	C	-5.90	B
28	7.34	C	4.56	C	-4.54	B
29	1.72	B	0.54	B	-2.05	B
30	1.12	B	0.86	B	-3.17	B
31	0.85	B	0.64	B	-2.11	B
32	5.25	C	2.91	B	-3.60	B
33	1.20	B	0.81	B	-3.84	B
34	0.95	B	0.53	B	-1.82	B
35	0.93	B	0.49	B	-1.86	B

Cuadro 17. Valores de la salinidad efectiva y de la salinidad potencial en las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro. Estados de Hidalgo y San Luis Potosí. México, Muestreo 2 Otoño 2007.

No	Salinidad efectiva	Clasificación	Salinidad potencial	Clasificación	Na ₂ CO ₃ Residual	Clasificación
1	2.69	B	2.40	B	-0.34	B
2	0.91	B	0.72	B	-0.55	B
3	1.11	B	0.92	B	-0.69	B
4	2.59	B	2.43	B	-0.66	B
5	1.48	B	1.25	B	-0.92	B
6	0.48	B	0.35	B	-0.33	B
7	0.43	B	0.32	B	-0.28	B
8	1.56	B	1.13	B	-0.91	B
9	3.04	C	2.19	B	-1.64	B
10	5.20	C	4.14	C	-0.87	B
11	5.16	C	3.94	C	-0.89	B
12	5.76	C	4.71	C	-0.31	B
13	4.54	C	3.65	C	-0.45	B
14	4.78	C	3.83	C	-0.68	B
15	8.88	C	5.92	C	-1.69	B
16	7.87	C	4.99	C	-1.01	B
17	6.66	C	5.15	C	-3.35	B
18	7.26	C	5.81	C	-1.65	B
19	8.09	C	6.53	C	-1.70	B
20	9.43	C	7.53	C	0.00	B
21	15.58	NR	10.58	C	-2.35	B
22	10.42	C	9.07	C	-0.71	B
23	9.51	C	7.40	C	-2.17	B
24	3.44	C	2.40	C	-1.80	B
24'	3.53	C	2.79	C	-1.75	B
25	2.72	B	2.14	C	-1.34	B
26	7.59	C	6.50	C	-1.27	B
27	6.93	C	6.01	C	-1.12	B
28	8.46	C	5.51	C	-2.46	B
29	0.89	B	0.87	B	-0.89	B
30	1.57	B	1.90	B	-2.54	B
31	0.67	B	0.94	B	-1.29	B
32	5.18	C	4.21	C	-2.06	B
33	1.04	B	0.88	B	-0.61	B
34	2.42	B	8.87	C	-15.86	B
35	0.53	B	0.66	B	-0.58	B
36	6.39	C	5.35	C	-2.21	B
37	0.72	B	0.91	B	-0.86	B
38	9.73	C	7.65	C	-10.51	B
39	5.85	C	5.16	C	-1.03	B
40	9.07	C	7.05	C	-12.28	B
41	0.61	B	0.99	B	-1.24	B
42	5.48	C	4.22	C	-3.52	B
43	2.00	B	2.79	B	-3.97	B
44	2.10	B	1.67	B	-1.78	B
45	1.88	B	1.58	B	-0.67	B
46	1.63	B	2.09	B	-2.00	B
47	2.59	B	2.12	B	-1.23	B

De acuerdo con el “índice” de clasificación salinidad potencial (SP) las aguas de las diferentes estaciones de muestreo se distribuyen como sigue: El 66% de éstas aguas se clasifican como buenas; y el 44% de éstas aguas se clasifica como condicionadas.

Y por último, por lo que atañe al “índice” carbonato de sodio residual (CSR) las aguas de las 35 estaciones de muestreo se clasifican como buenas el 100%.

5.7.2 MUESTREO 2 OTOÑO 2007.

En lo que concierne, a como quedan clasificadas las aguas de las 48 estaciones de muestreo; de acuerdo con el “índice” de clasificación salinidad efectiva (SE) el porcentaje de aguas de buena calidad fue de 45.83%; el 52.08% fue clasificada como aguas condicionadas y el 2.08% fue clasificada como no recomendable.

De acuerdo con el “índice” salinidad potencial (SP); las aguas de las distintas estaciones de muestreo se clasifican como sigue: se consideraron como aguas de buena calidad el 43.75% y el 56.25% de las aguas de las 48 estaciones de muestreo fue considerado como aguas condicionadas.

Y por último, en lo que se refiere, al “índice” de clasificación carbonato de sodio residual (CSR): las aguas de las 48 estaciones de muestreo se clasificó como aguas de buena calidad.

5.8 DISTRIBUCIÓN DE LOS ORTOFOSFATOS EN LAS ESTACIONES DE MUESTREO (P04-3).

En las directrices para interpretar la calidad de las aguas para riego (Ayers y Westcot, 1987), señalan que el contenido de fósforo como fosfato en las aguas de riego normales es de 0.0-2.0 mg L⁻¹.

También se ha mencionado que, las aguas de origen urbano-industrial que tienen su derivación de los procesos industriales; de la más variada actividad fabril, y también de uso doméstico, se han aplicado a los suelos, y que esta práctica ha

traído ciertos beneficios como: 1. La reutilización del fósforo y; 2. Aumento de las cosechas que se riegan con aguas residuales.

El fósforo se encuentra en los suelos y en las aguas en las dos formas orgánicas e inorgánicas. La concentración de las formas inorgánicas ($H_2PO_4^-$ y HP_04^{2-}) en la solución del suelo es el factor particular más importante que gobierna la disponibilidad de este elemento para las plantas.

5.8.1 MUESTREO 1 PRIMAVERA 2006.

En la figura 14; se presenta la distribución de los ortofosfatos en las aguas de las 35 estaciones de muestreo del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro. En esta figura se puede observar que las aguas que corresponden a la región de la presa Taximhay-Tepeji del Río, el contenido de ortofosfatos es de 0.10-0.40 mg L⁻¹. También se puede observar que la concentración de ortofosfatos en las aguas de las estaciones de muestreo que corresponden a la zona Río Moctezuma-Río Claro fue de 0.10-0.40 mg L⁻¹. Las concentraciones más altas de ortofosfatos se presentaron en las aguas de la zona del cauce general que corresponde a la región del Valle del Mezquital y que comprende a la zona del Río Moctezuma. La concentración de ortofosfatos en esta zona fue de 0.40-1.40 mg L⁻¹.

5.8.2 MUESTREO 2 OTOÑO 2007.

En la figura 15; se presenta la distribución de los ortofosfatos en las aguas de las 48 estaciones de muestreo del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro. En esta figura se puede observar que las aguas corresponden a la región de la presa Taximhay-Tepeji del Río; el contenido de ortofosfatos fue de 0.2-0.3 mg L⁻¹.

También se puede observar que la concentración de ortofosfatos en las aguas de las estaciones de muestreo que corresponden a la zona Río Moctezuma-Río Claro fue de 0.10-0.20 mg L⁻¹. Por último las concentraciones más altas de ortofosfatos se presentaron en las aguas de la zona del cauce general que corresponde a la

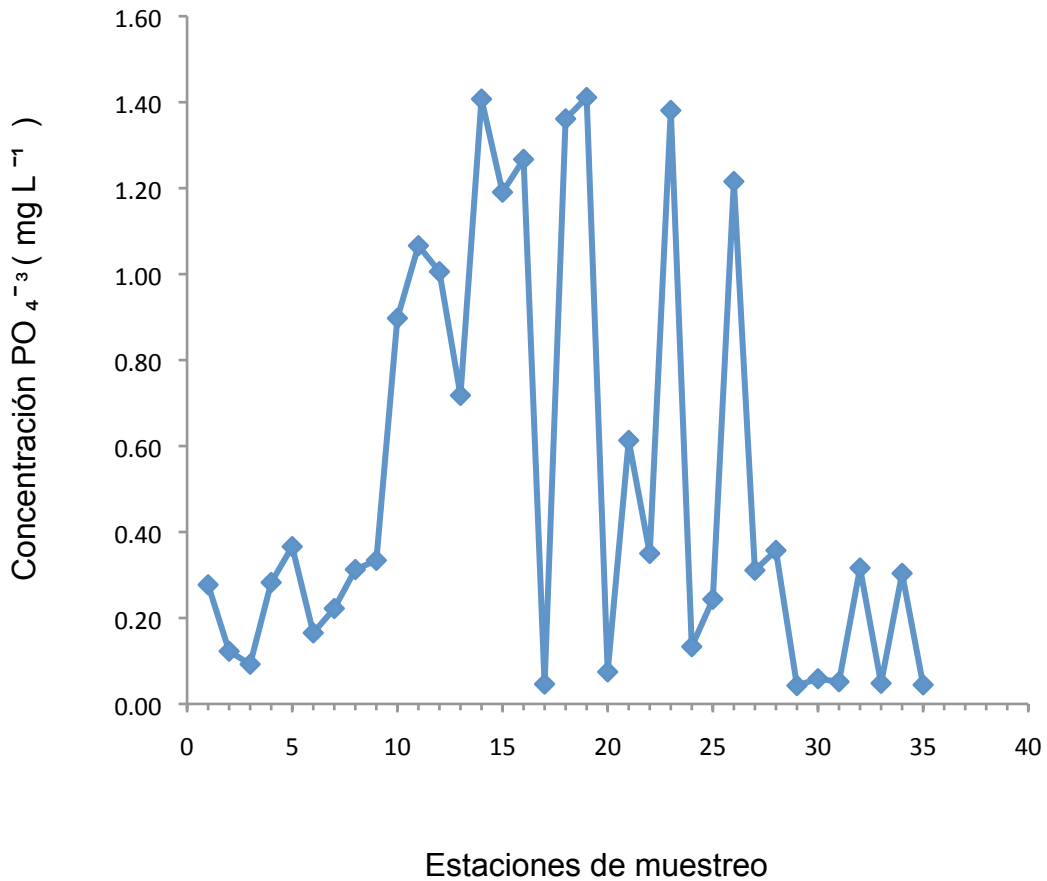


Figura 14 . Distribución del contenido de ortofosfatos de las estaciones de muestreo en las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctézuma-Río Claro Estados de Hidalgo y San Luis Potosi, México Muestreo 1. Primavera 2006.

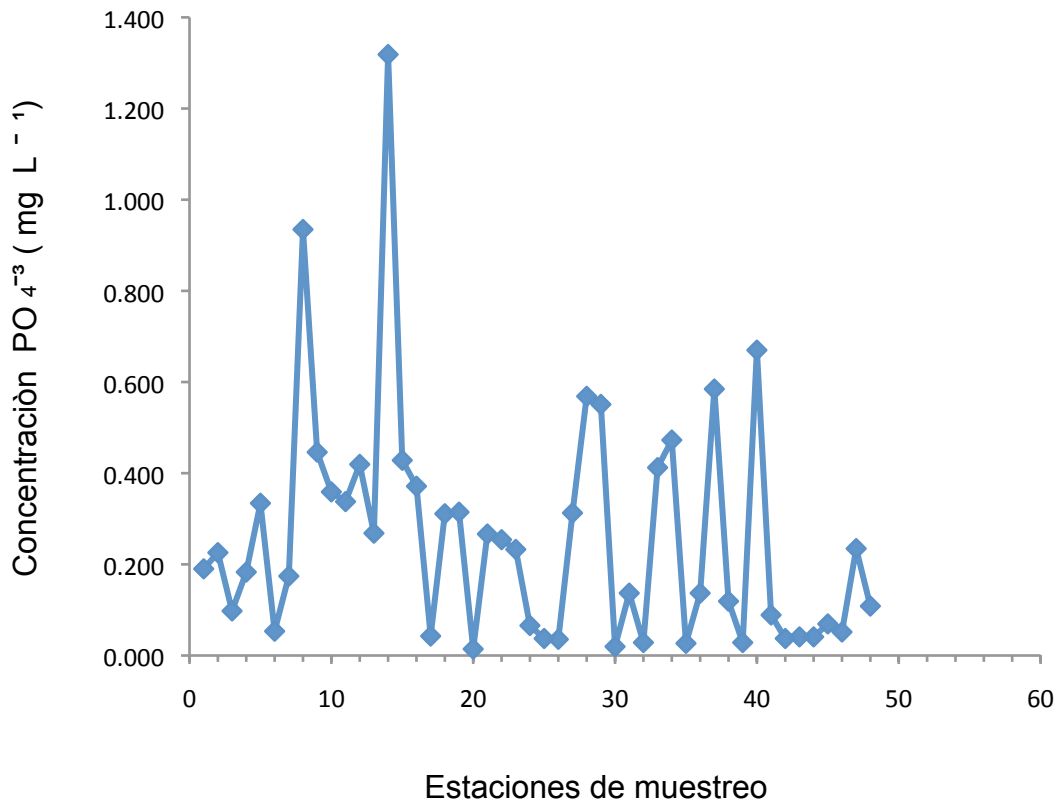


Figura 15. Distribución del contenido de ortofosfatos en las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctézuma-Río Claro Estados de Hidalgo y San Luis Porosí, México. Muestreo 2 Otoño 2007.

región del Valle del Mezquital y que comprende a la zona del Río Tula-Río Moctezuma. La concentración de ortofosfatos en esta zona fue de 0.20-0.40-0.60-1.30 mg L⁻¹.

5.9 DISTRIBUCIÓN DE LOS CONTENIDOS DE BORO mg L⁻¹.

El boro es un elemento esencial para el desarrollo de las plantas. El sodio por lo contrario no es esencial, aunque sin embargo se requieren cantidades muy pequeñas de sodio, mientras que el cloro es esencial en cantidades tan pequeñas que a menudo es clasificado como no esencial.

El boro es necesario en cantidades relativamente pequeñas, y se convierte en tóxico cuando sobrepasa estos niveles. Para algunos cultivos, por ejemplo, si el nivel esencial del boro en el agua es de 0.2 mg L⁻¹; las concentraciones de boro entre 1.0 y 2.0 mg L⁻¹ son tóxicos. Las aguas superficiales rara vez contienen niveles tóxicos de boro, pero las aguas de los manantiales y las aguas de los pozos pueden contener concentraciones tóxicas, principalmente en las cercanías de fallas tectónicas y en las zonas geotérmicas. La toxicidad puede afectar prácticamente a todos los cultivos, pero como ocurre con la salinidad, la gama de tolerancia es bastante amplia.

5.9 MUESTREO 1 PRIMAVERA 2006.

En la figura 16; se presenta la distribución del contenido de boro en la Red hidrográfica del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro en las aguas de las 35 estaciones de muestreo.

La concentración del boro varía de 0.25-2.0-3.50 mg L⁻¹ en el tramo Presa Taximhay-Tepeji del Río. En cambio en la zona Río Tula-Río Moctezuma la concentración de boro varía de 0.25-2.0-3.0-4.0 mg L⁻¹.

5.9.2 MUESTREO 2 OTOÑO 2007.

En la figura 17; se presenta la distribución del contenido del boro en la Red hidrográfica del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro en las aguas de

102

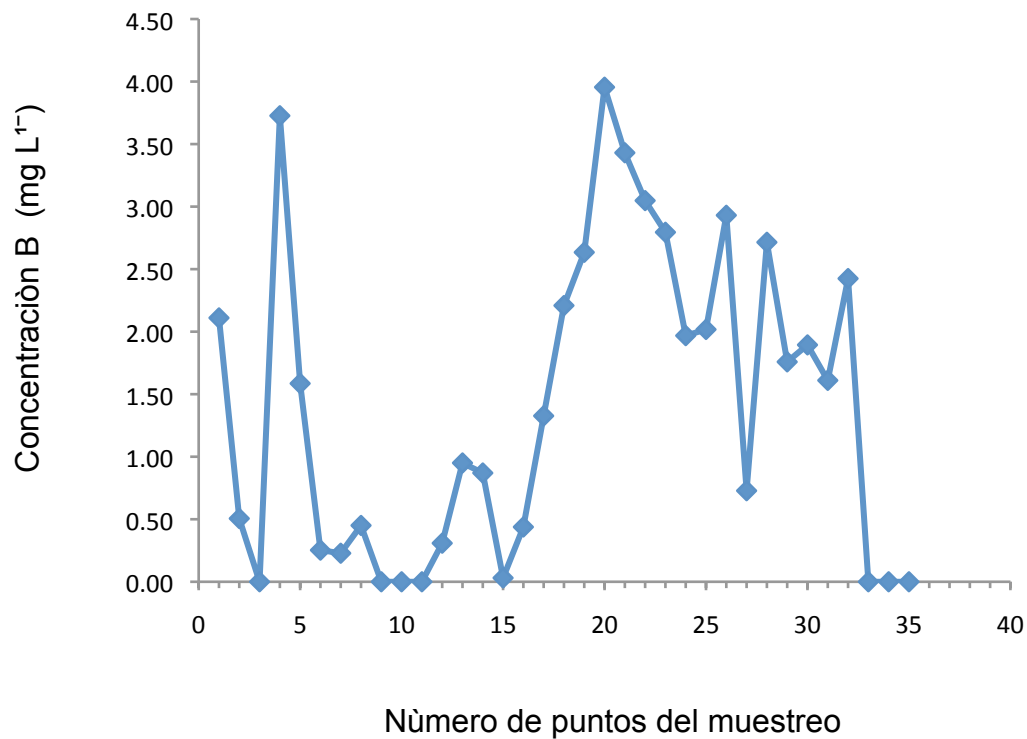


Figura 16 . Distribución del contenido de boro de las estaciones de muestreo de las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma - Río Claro Estados de Hidalgo, San Luis Potosí, México Primavera 2006.

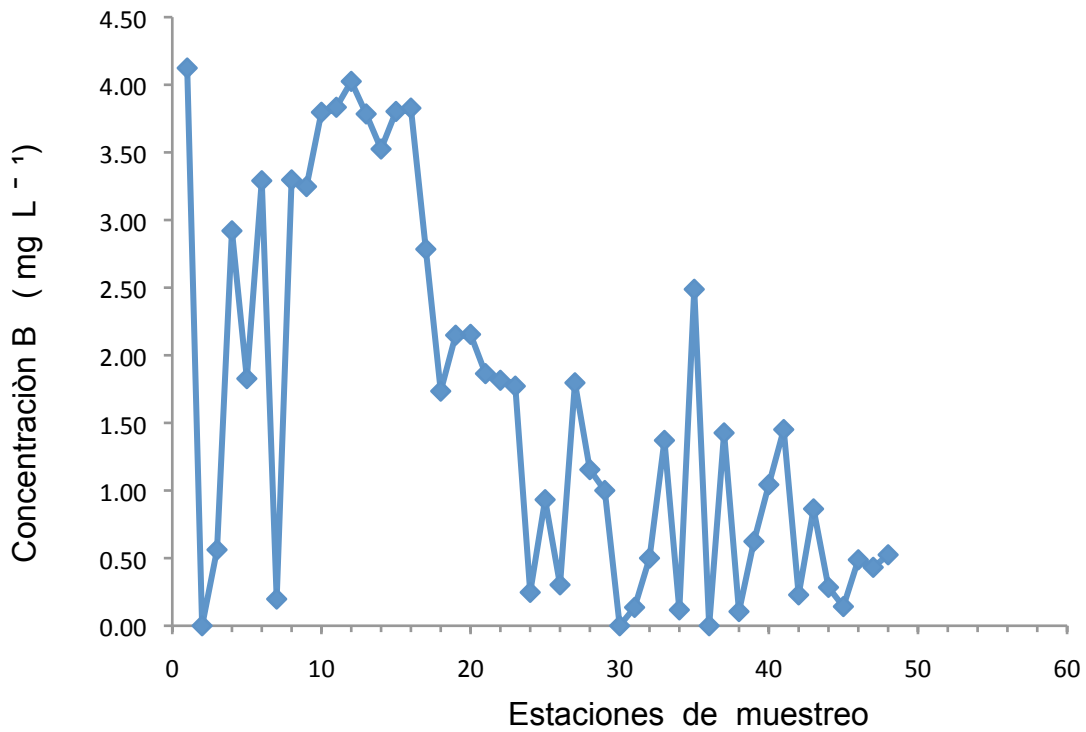


Figura 17 . Distribución del contenido de boro en las aguas que circulan en el cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro Estados de Hidalgo y San Luis Potosi, México. Muestreo 2 Otoño 2007.

las 48 estaciones de muestreo. En el tramo del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro que corresponde a la Presa Taximhay-Tepeji del Río la concentración de boro varía como sigue: 0.25-2.0-3.25 mg L⁻¹ sin embargo, en el tramo que corresponde a la zona del valle del Mezquital y que se comprende dentro del cauce general a la zona del Río Tula-Río Moctezuma; las concentraciones del boro variaron como sigue: 0.25-3.0-4.0-1.5 mg L⁻¹. En las estaciones de muestreo de la zona del tramo Río Moctezuma-Río Claro las concentraciones del boro variaron como sigue: 0.25-0.50-1.50 mg L⁻¹.

VI. CONCLUSIONES.

1. Las aguas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro se clasifican como sigue: a. El tramo Presa Taximhay-Presa Requena las aguas son cálcico-magnésico-bicarbonatadas de baja concentración; b. En el tramo Río Tula-Río Moctezuma las aguas son bicarbonatado-sódicas de mediana y alta concentración y c. En el tramo Río Moctezuma-Río Claro las aguas son cálcico-magnésicas bicarbonatadas de baja y mediana concentración.
2. Para el muestreo 2 de Primavera 2006, el coeficiente de la relación funcional $\text{mg L}^{-1} = fa \text{ (CE)}$, es $a = 0.706$.

Este coeficiente (a) corresponde a aguas que contienen cantidades considerables de bicarbonatos.
3. La presión osmótica de las muestras de agua del muestreo de primavera 2006 tuvo un valor medio de: $x = 31 \text{ kPa}$. Para el muestreo de Otoño 2007; la presión osmótica en su valor promedio fue de: $x = 26 \text{ kPa}$.
4. La evaluación de la Relación de Adsorción en sus diferentes formulaciones (RAS_{or} , RAS_{aj} y RAS_{cor}), de las diferentes aguas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro permiten establecer valores límites máximos y mínimos de los efectos negativos del sodio intercambiable en las propiedades físicas de los suelos.
5. Las aguas residuales y mezcladas de esta Red Hidrográfica aportan a la zona de riego cantidades importantes de fosfatos $0.5\text{-}1.5 \text{ mg L}^{-1}$.
6. Los contenidos de Boro en las aguas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro son perjudiciales para los cultivos sensibles ($2.0\text{-}4.0 \text{ mg L}^{-1}$).

Las aguas residuales y mezcladas del cauce general Río Tula-Río Moctezuma-Río Claro poseen las siguientes composiciones químicas:

1. Tramo Presa Taximhay-Presa Requena. Estas aguas son cálcico-magnésico-bicarbonatadas de baja concentración= $120-380 \mu\text{S cm}^{-1}$. Aquí se deben incorporar pequeñas cantidades de iones de calcio= 3.0 mmolc L^{-1} para mejorar la relación $\text{NaCa}+2+\text{Mg}+2$.
2. Tramo Río Tula-Río Moctezuma que abarca la zona del Valle del Mezquital. Aquí las aguas son del tipo bicarbonatado-sódicas de mediana y alta concentración.

En éste tramo se deben agregar fuentes de calcio para preveer los problemas de infiltración y mejorar en los suelos la relación $\text{NaCa}+2+\text{Mg}+2$

3. Las aguas del tramo Río Moctezuma-Río Claro son de buena calidad y de composición cálcico-magnésico-bicarbonatada de baja concentración. Hasta este tramo de escurrimiento estas aguas no requieren mejoramiento.

VIII. LITERATURA CITADA

- Abrol, I.P., and D.R. Bhumbla. 1973. Leaching alone does not pay: Apply gypsum in alkali soils. *Indian Farming* 23: 13-14.
- Abu-Sharar, T.M., F.T. Bingham, and J.D. Rhoades. 1987a. Reduction in hydraulic conductivity in relation to clay dispersion and disaggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 342-346.
- Abu-Sharar, T.M., F.T. Bingham, and J.D. Rhoades. 1987b. Stability of soil aggregates as affected by electrolyte concentration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 309-314.
- Aceves, N., E., y Palacios., V.O. 1970. Instructivo para el muestreo, registro de datos e interpretación de la calidad del agua para riego. Colegio de Postgraduados. Chapingo, MÉXICO.
- Agassi, M., J. Morin, and I. Shainberg. 1982. Laboratory studies of infiltration and runoff control in semi-arid soils in Israel. *Geoderma* 28: 345-356.
- Antipov-Karataev., I., N., 1967. Reclamation of solonetz soils in the USSR. Israel Program for scientific Translation. Jerusalén.
- APHA. American Public Health Association. 1989. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 17th. Edition Port City Press, Baltimore, Maryland.
- Ayers, R., S., y Wescot. 1987. La calidad del agua y su uso en la agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje 29 Rev. 1 Trad. Al español por J. F. Alfaro de: Water quality and use in agricultura. 174p.
- Baes, A., U., and P.R. Bloom. 1988. Exchange of alkaline earth cations in soil organic matter. *Soil Sci.* 146: 6-14.
- Bahri, A. 1988. Treated wastewater and sewage sludge in Tunisia. In: Wastewater reclamation and reuse. FAO Regional Office for The Near East. El Cairo, Egypt.
- Bawer, G. 1987. Influence of the agricultural crops irrigation and Drainage Eng. 1: 4-15.
- Bingham, F., T., R.J. Mahler, and G. Sposito. 1979. Effects of irrigation water composition on exchangeable sodium status of field soil. *Soil Sci.* 127: 248-252.

- Binham, F., T., J.D. Rhoades, and R. Keren. 1985. An application of the Maas-Hofman salinity response model for boron toxicity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 672-674.
- Bower, C., A., G. Ogata, and J.M Tucker. 1969. Rootzone salt profiles and alfalfa growth as influenced by irrigation water salinity and leaching fraction. *Agron. J.* 61: 783-785.
- Bresler, E. 1987. Application of a conceptual model to irrigation water requirement and salt tolerance of crops. *Soil Sci. Am. J.* 51: 788-793.
- Bresler, E., and G.J. Hoffman. 1986. Irrigation management for soil salinity control: Theories and test. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1551-1560.
- Can, C., A. 2005. Evaluación de la Relación de Adsorción de Sodio en las aguas del cauce del río Tulancingo, Estado de Hidalgo, México. Tesis de la maestría en ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México. P. 198.
- Cintora, M, y Ortega M. 2005. Boro fósforo e índices de salinidad en las aguas residuales para el riego agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. p 106.
- Chang, S. P., and G.A. O' Connor. 1980. Salinity effects on hydraulic properties of soils. *Soil Sci.* 130(3): 167-174.
- Chaudhry, G.,H., and B.P. Warkentin. 1968. Studies on exchange of sodium from soils by leaching with calcium sulphate. *Soil Sci.* 105: 190-197.
- Chawla, K.L., and I.P. Abrol. 1982. Effect of gypsum fineness on the reclamation of sodic soils. *Agric. Water Manage.* 5: 41-50.
- Cruz Romero, G., and N.T. Coleman. 1975. Reactions responsible for high pH of Na Saturated soil and clays. *J of Soil Sci:* 26: 169-175.
- Curtin, D., F. Selles and H. Steppuhn. 1992. Influence of Salt concentration and sodicity on the solubility of phosphate in soils.- *Soil Sci.* 153: 409-416.
- Curtin, D., H. Steppuhn and F. Selles. 1994. Effects of magnesium on cation selectivity and structural stability of sodic soils. *Soil Sci. Soc. Am J.* 58: 730-737.
- Davidson, J.L., and J.P. Quirk. 1961. The influence of dissolved gypsum on pasture establishment on irrigated sodic clays. *Aust. J. Agric. Res.* 12: 100-110.

- Emerson, W.,W. 1984. Soil structure in saline and sodic soils. P. 65-76. In I. Shainberg and J. Shalhevet (ed.) Soil salinity under irrigation. Ecol. Stud. Vol. 51. Springer-Verlag New York, New York.
- Garza, V. 1994. La Legislación ambiental en México en referencia a la generación y uso de aguas residuales. Salud Fronteriza. 1994. VII(1): 11-16.
- Gobran, G.R., J.E. Dufey, and H. Laudelot. 1982. The use of gypsum for preventing soil sodification: Effect of gypsum particle size and location in the profile. J. Soil Sci. 33: 309-316.
- Haruvy, N. 1997. Agricultural reuse of wastewater: nation-wide cost-benefit analysis. Agriculture, Ecosystems and Environment. 10(1): 69-79.
- Hira, G.S., M.S. Bajwa, and N.T. Singh. 1981. Prediction of water requirements for gypsum dissolution in sodic soils. Soil Sci. 131: 353-358.
- Hira, G.S., and N.T. Singh. 1980. Irrigation water requirement for dissolution of gypsum in sodic soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 930-933.
- Huez L., M. 1985. Caracterización de algunas propiedades físico químicas de los suelos y espesores subyacentes del predio Montecillos. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Estado de México. p. 245.
- Jury, W.A., W.M. Jarrell, and D. Devitt. 1979. Reclamation of saline sodic soils by leaching. Soil Sci. Soc. Am. J. 43:1100-1106.
- Kovda, V. 1973. In Irrigation/Drainage and salinity. An international source book. Chapters 5 y 7. FAO/UNESCO.
- Magdoff, F., and E. Bresler. 1973. Evaluation of methods for reclaiming sodic soils with CaCl_2 . p. 441-452. In A. Hadas et al. (ed.) Physical aspects of soil water and salts in ecosystems. Vol. 4. Springer-Verlag, Berlin.
- McIntyre, D.S. 1958. Permeability measurements of soil crusts formed by raindrop impact. Soil Sci. 84: 185-189.
- McNeal, B.L., and N.T. Coleman. 1966a. Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 30: 308-312.
- McNeal, B.L., and N.T. Coleman. 1966a. Effect of solution composition on the swelling of extracted soil clays. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 30: 313-317.

- Ortega, E. H. 1976. Cambios físico-químicos de suelos del vaso del ex-lago de Texcoco, sujetos a lavado con diferentes soluciones. Tesis de Maestría en Ciencias. Riego y Drenaje. Colegio de Posgraduados pp. 109.
- Oster, J.D. 1982. Gypsum usage in irrigated agriculture: A review. *Fert. Res.* 3: 73-89.
- Oster, J.D., and Frenkel. 1980. The chemistry of the reclamation of sodic soils with gypsum and lime. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 41-45.
- Oster, J.D., and F.W. Schroer. 1979. Infiltration as influenced by irrigation water quality. *Soil. Sci. Am. J.* 43: 444-447.
- Peña, I. 1979. Salinidad de suelos agrícolas: en origen y clasificación, prevención y rehabilitación. *Boletín Técnico* 10. SARH. México.
- Ramalho, R. S. 1998. Tratamiento de aguas residuales. Ed. Reverte, S. A de C. V. México. 88 pp.
- Reeve, R.C., and G. Tamaddoni. 1965. Effect of electrolyte concentration on laboratory permeability and field intake rate of a sodic soil. *Soil Sci.* 99: 261-266.
- Rhoades, J.D. 1972. Quality of water for irrigation. *Soil Sci.* 113: 277-284.
- Rhoades, J.D., D.B. Kriuger, and M.J. Reed. 1968. The effect of soil mineral weathering on the sodium hazard of irrigation waters. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32: 643-674.
- Velázquez-Machuca, M. A., Ortega-Escobar, M., Martínez-Garza, A., Kohashi Shibata, J. y García-Calderón, N. 2002. Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *TERRA*. Volumen 20. Número 4. pp.459-464.

