




Composición iónica y comparación de índices de salinidad de suelo agrícola de Texcoco, México

Ionic composition and comparison of salinity index of agricultural soil from Texcoco, Mexico

Mario Francisco Santoyo de la Cruz ¹
Héctor Flores-Magdaleno ¹  [0000-0001-6404-7957](https://orcid.org/0000-0001-6404-7957)
Abdul Khalil-Gardezi ¹
Óscar Raúl Mancilla-Villa ²  [0000-0003-4845-1188](https://orcid.org/0000-0003-4845-1188)
Juan Enrique Rubiños-Panta ¹  [0000-0002-9788-0280](https://orcid.org/0000-0002-9788-0280)

¹ Colegio de Postgraduados, campus Montecillo. Departamento de hidrociencias ✉ mhector@colpos.mx
² Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa Sur. Departamento de Producción Agrícola
© Universidad De La Salle Bajío (México)

Palabras clave: calcio; catión; conductividad eléctrica; interpolación; iones; lago de Texcoco; salinidad; sodicidad; sodio; suelo

Keywords: calcium; cation; electric conductivity; interpolation; ions; salinity; sodicity; sodium; soil; Texcoco lake

Recepción: 05 – 01 – 2021 / Aceptación: 19 – 08 – 2021

Resumen

Introducción: la salinidad del lago de Texcoco se debe a que éste fue una cuenca endorreica, no tenía forma de lavar las sales. Las causas de salinización de los suelos agrícolas en estas parcelas son: manejo deficiente del riego, uso de aguas de baja calidad para riego y uso excesivo de los fertilizantes químicos. El objetivo de este trabajo fue analizar la composición iónica y comparar la relación de adsorción de sodio-porciento de sodio intercambiable explícita y ajustada de una parcela agrícola.

Método: se hizo un muestreo de suelo para determinar los parámetros de: pH, conductividad eléctrica, calcio, magnesio, sodio, potasio, carbonato, bicarbonato, cloruro y sulfato, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000. Además, se realizaron mapas de interpolaciones y curvas de nivel.

Resultados y discusión: de acuerdo con los resultados obtenidos del laboratorio, la parcela es de suelo salino-sódico. Se encontró diferencia significativa entre la relación de adsorción de sodio (RAS) y la relación de adsorción de sodio ajustada, siendo este último el más elevado. Las imágenes interpoladas y las curvas de nivel dan una visión artificial de la relación de adsorción de sodio y el porciento de sodio intercambiable (PSI).

Conclusión: en general, la parcela presenta valores elevados de RAS y PSI. Por lo que en casi toda la parcela existe riesgo de sodicidad. Existen diferencias significativas entre RAS y RAS ajustado, pero no existe diferencia de importancia entre el PSI y el PSI calculado con RAS ajustado. La clasificación RAS-CE, en la mayoría de los casos, presenta suelos de salinidad muy alta y sodicidad media (C4-S2).

Abstract

Introduction: the salinity of Lake Texcoco is due to the fact that it was an endorheic basin, it had no way of washing the salts. The causes of salinization of agricultural soils in these plots are: poor irrigation management, use of low quality water for irrigation and excessive use of chemical fertilizers. The objective of this work was to analyze the ionic composition and compare the sodium adsorption ratio – explicit and adjusted exchangeable sodium percentage of an agricultural plot.

Method: soil sampling was done to determine the parameters of: pH, electrical conductivity, calcium, magnesium, sodium, potassium, carbonate, bicarbonate, chloride, and sulfate, according to NOM-021-RECNAT-2000. In addition to interpolation maps and contour lines.

Results and discussion: according to the results obtained from the laboratory, the plot is made of saline – sodium soil. A significant difference was found between the sodium adsorption ratio (SAR) and the adjusted sodium adsorption ratio, the latter being the highest. The interpolated images and contour lines give an artificial view of the sodium adsorption ratio and the percent exchangeable sodium (ESP).

Conclusion: in general, the plot presents high values of SAR and ESP. So, in almost the entire plot there is a risk of sodicity. There are significant differences between SAR and adjusted SAR, but there is no significant difference between ESP and ESP calculated with adjusted SAR. The SAR-EC classification in most cases present soils of very high salinity and medium sodicity (C4-S2).

Introducción

La salinidad del lago de Texcoco se debe a que fue una cuenca endorreica por lo que no tenía forma de lavar las sales provenientes de las desgastadas elevaciones montañosas formadas por roca ígnea y tobas volcánicas, en este lugar existían depósitos abundantes ricos en carbonatos y cloruros. Siendo muy probable que los escurrimientos superficiales que atravesaban los depósitos se

desprendieran y transportaran las sales en forma de cationes y aniones y lo depositaran en el lago, donde la salinización comenzó a notarse. Además, se localizaba en la parte más baja de la cuenca (aproximadamente a 2 235 m de altura) (Gutiérrez *et al.*, 1998 y Espinosa, 2008). Y recibía el agua de los otros lagos en época de lluvias, lo anterior por ser el lago más bajo que los demás de junto.

El lugar de estudio se localiza en donde antiguamente era el lago de Texcoco ha sido objeto de diversas acciones que lo han conducido a su desecación. Desde la época de la Colonia, en sus alrededores se dieron obras de desagüe, deslindes, fraccionamientos y ventas clandestinas que lo condujeron a ser terreno urbano del valle de México. Desde la época prehispánica, en la cuenca se formaba un sistema de lagos, resultado de las corrientes fluviales que bajaban de las montañas. Los lagos que formaban parte de este sistema hidrológico eran: Zumpango, Xaltocan, Texcoco, México, Chalco y Xochimilco (Espinosa, 2008).

Los suelos del ex lago de Texcoco presentan horizontes enriquecidos con carbonato de calcio compuestos por diferentes rasgos calcínicos que forman horizontes cálcicos y petrocálcicos. Estos suelos están relacionados con depósitos de aguas salinas y escasas precipitaciones. Los suelos del ex lago de Texcoco son de origen aluvial-lacustre y se desarrollaron a partir de sedimentos. Este hecho puede hacer posible la diferenciación entre los rasgos que tienen un origen sedimentario de los pedogenéticos (Gutiérrez *et al.*, 1998). El calcio y el sodio son iones de los más abundantes en este tipo de lagos, lo que da lugar a investigaciones relevantes de suelos y aguas con problemas de ensalitramiento.

En México, los suelos de origen volcánico se ubican principalmente en laderas y pie de montes del Eje Neovolcánico Mexicano (ENM) y sus aguas han sido foco de explotación masiva durante los últimos cien años. La densa población humana ejerce una elevada presión sobre las tierras de cultivo. Extensas superficies se encuentran erosionadas, con baja fertilidad y productividad (Pajares *et al.*, 2010). Esta erosión ha expuesto amplias áreas de tepetates; ubicados entre 1800 y 3400 m a lo largo del ENM. En los estados de Tlaxcala y México los tepetates ocupan una superficie de poco más de 30,000 km² (Zebrowski, 1992 y Etchevers *et al.*, 2006).

Los suelos antrosolos tarricos lacustres se desarrollan en depresiones de cuencas de montaña de climas templados subhúmedos, típicos del centro del país, con marcada discontinuidad en las propiedades físicas y químicas del perfil. Tienen formación en cuencas altas templadas, pero drenados de modo artificial, actualmente con cultivos agrícolas. Son suelos que se formaron por depósito en aguas tranquilas con desecación abrupta, presentan pH de neutro a alcalino (6.9-10.6

salinos). En estos suelos se reportan rasgos micromorfológicos del carbonato de calcio formado en los diferentes ambientes evolutivos del lago con pérdida de rasgos redoximórficos (Medina-Orozco *et al.*, 2014). Las características generales de las tierras del ex lago de Texcoco tienen apariencia oscura (chromas de 4 a 3 en seco y de 3 a 2 en húmedo), texturas finas (arcillosas y arcillo-limosas), estructura granular en las capas superficiales, propiedades vérticas y grietas en la superficie (Segura *et al.*, 2000).

Las causas principales de la salinización de los suelos agrícolas en estas parcelas son: filtración en la red de canales de tierra, manejo deficiente del riego, conservación deficiente de la red de drenaje, uso de aguas de mala calidad para riego y fluctuación de los mantos freáticos someros (Coras *et al.*, 2014). El resultado de la salinización a largo plazo es la deficiencia en los rendimientos de los cultivos o la nula germinación de las plántulas.

Las aguas de mala calidad son aquellas que pueden provocar daños fisiológicos a los cultivos por el alto contenido de iones y sales presentes en el recurso hídrico, además de dañar los cultivos genera salinización de suelos y por ende pérdidas económicas para los productores y degradación del suelo (Mancilla *et al.*, 2021), mientras que las aguas de buena calidad son bajas en sales y iones y no provocan los daños mencionados, además de ayudar al crecimiento de la planta.

En los suelos alcalinos los cationes más abundantes son el calcio, magnesio, potasio y sodio. Con buena fertilidad, el orden de la concentración debe de ser de $\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2}\text{K}^{+1} > \text{Na}^{+1}$, si este orden se altera se pueden presentar problemas para la producción agrícola, sin embargo, si el valor de pH es > 8.5 entonces la distribución sería $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}) > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ (Bohn *et al.*, 2001).

Los sedimentos lacustres del subsuelo del lago de Texcoco son medios heterogéneos y el subsuelo es altamente corrosivo debido a su salinidad. Hay diversas facies litológicas con intercalaciones de cenizas volcánicas (Carranza, 2018). La precipitación media anual de la zona de estudio es de 650.73 mm, la cual genera un volumen llovido de 611.061 $\text{hm}^3/\text{año}$. La temperatura media anual es de 15.48 °C y un volumen anual evapotranspirado de 496.57 hm^3 (Escobar y Palacios, 2012).

Según Velázquez *et al.* (2002), la RAS no contempla las diferencias físico-químicas esenciales de los iones polivalentes de Ca^{2+} y Mg^{2+} de esto parte que los procesos de hidrólisis se manifiestan con diferente intensidad y se considera que estos iones se comportan de manera similar y no se consideran las variaciones de las concentraciones de Ca^{2+} debido a su precipitación en

condiciones de $\text{pH} > 8.2$, mientras que la RAS ajustada incluye la disposición de calcio en condiciones de un pH de un suelo no sódico en equilibrio con CaCO_3 .

El objetivo de este trabajo es analizar la composición iónica, la comparación de los índices de salinidad RAS-PSI explícita y ajustada, la clasificación con respecto a la RAS y la conductividad eléctrica (CE) así como la clasificación de la salinidad potencial y efectiva de un terreno de uso agrícola.

Materiales y método

El trabajo se realizó en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo con las coordenadas geográficas $19^\circ 27' 52''$ N y $98^\circ 54' 44''$ O y altitud de 2239 m (fig. 1). Se realizó muestreo de suelo en una parcela agrícola en el mes de febrero de 2018. El método de muestreo utilizado fue de cuadrícula de 15x15 m donde se recolectaron 156 muestras de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000. La superficie total del terreno fue de 4 ha. Posteriormente se midió las coordenadas geográficas de alta precisión con el uso de la estación receptora GPS-GNSS. Marca Hi Target.

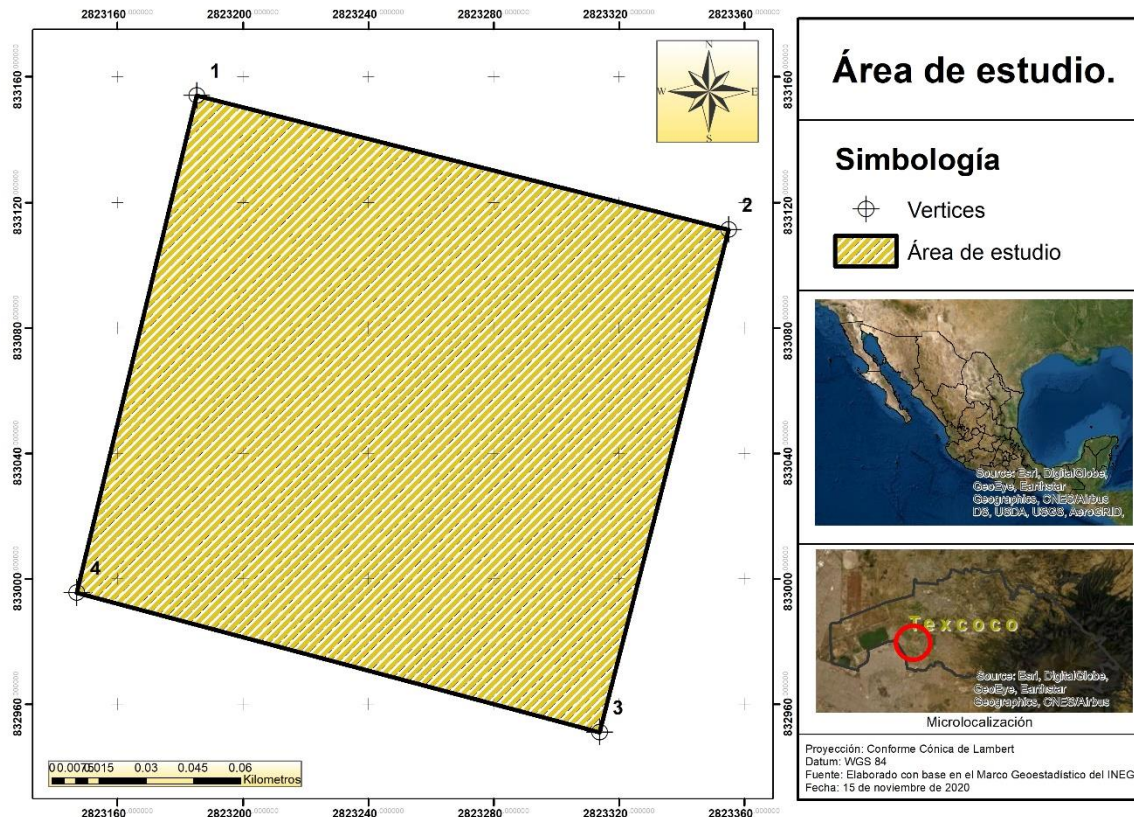


Fig. 1. Parcela agrícola muestreada en el Colegio de Postgraduados campus Montecillo, Texcoco México.
Fig. 1. Agricultural plot sampled at the Montecillo Campus Postgraduate College, Texcoco Mexico.

Se utilizó el método analítico de laboratorio de (Clesceri *et al.*, 1998 y Richards, 1982) para determinar los parámetros de salinidad de suelos (pH, conductividad eléctrica, calcio, magnesio, sodio, potasio, carbonato, bicarbonato, cloruro y sulfato). En la verificación de la exactitud de los datos obtenidos se utilizó el método del balance anión-catión; conductividad eléctrica medida y la suma de cationes y aniones. La RAS analiza el efecto de la concentración de sodio sobre las propiedades físicas del suelo (Aceves, 2011). Estos índices se calculan de la siguiente manera:
RAS explícito:

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

Donde:

Na⁺¹, Ca⁺² y Mg⁺²: corresponden a la concentración (mEq L⁻¹)

RAS ajustado:

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

pHc: es el pH calculado a partir de la fuerza iónica y la concentración de Ca^{2+} y ($CO_3^{2-} + HCO_3^-$).

El pHc se calcula de acuerdo con *Bower et al.* (1968):

$$pHc = (pk'2 - pk'c) + pCa + pAlk$$

Donde:

$pk'2 - pk'c$ = son los logaritmos negativos de segunda constante de disociación del ácido carbónico (H_2CO_3) y la constante de solubilidad del carbonato de calcio ($CaCO_3$), ambos corregidos por su fuerza iónica (I).

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

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

El ($pk'2 - pk'c$) se obtiene mediante la siguiente ecuación matemática:

$$pK2 - pKc = 2.0269 + \left[0.5092 \left(\frac{4.0\sqrt{\mu}}{1 + 2.0\sqrt{\mu}} + \frac{\sqrt{\mu}}{1.0 + 1.45\sqrt{\mu}} \right) \right]$$

Donde:

2.0269 es la diferencia entre ($pk'2 - pk'c$): $K_2 = 4.7 \times 10^{-11}$ y $K_c = 5.0 \times 10^{-9}$

μ : es la fuerza iónica y está relacionada con la concentración total de cationes (C en mEq L⁻¹), la ecuación de regresión es la siguiente:

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

El PSI se utiliza para conocer en que niveles el ion sodio se adsorbe. Por consiguiente, cualquier posible evaluación del peligro potencial de la sodicidad deberá relacionarse con el PSI, que tendrá

que encontrarse en el suelo derivado del uso de las aguas de riego (Can, 2011). El PSI significa el porcentaje de cargas negativas utilizadas u ocupadas con iones de sodio mediante la ecuación propuesta por Richards (1982):

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

Se calcularon los PSI con los coeficientes de selectividad de Gapon con la siguiente formula (Can, 2011).

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

Con los resultados de RAS, RASaj y CE se obtuvieron las clasificaciones de acuerdo con el diagrama de Richards (1982) y la salinidad efectiva y potencial se realizó con base a las formulaciones de Castellón *et al.* (2014).

Se elaboraron mapas de curvas de nivel e interpolación TIN (Red Irregular Triangulada) de los resultados encontrados de RAS-PSI y RAS-PSI ajustado, con este método se pueden crear superficies formadas por triángulos de puntos vecinos más cercanos (QGIS, 2019). Se utilizó el software QGIS 3.16.0 Hannover.

Se calcularon los cuartiles estadísticos y estadística descriptiva a los datos de la composición iónica.

Resultados y discusión

En la tabla 1 presenta los valores de estadística descriptiva de los cationes, donde el Na⁺¹ es más predominante en el sitio con promedio de 49.03 mEq L⁻¹, en aniones el SO₄⁻² es el más representativo con valor de 53.75 mEq L⁻¹ en promedio.

Tabla 1. Estadística descriptiva de los datos (*outliers*) obtenidos.
Table 1. Descriptive statistics of the data (*outliers*) obtained.

	CE	pH	Na ⁺¹	K ⁺¹	Ca ⁺²	Mg ⁺²	CO ₃ ⁻³	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	RAS aj	RAS	PSI aj	PSI
	dS m ⁻¹		mEq L ⁻¹											
Media	65,47	8,20	49,03	9,76	6,28	9,76	0,59	6,88	18,19	53,75	40,42	20,00	35,51	21,42
Mediana	61,40	8,19	44,05	9,26	5,50	8,80	0,60	6,66	17,02	51,25	34,39	16,61	33,09	18,85
Moda	42,10	8,05	46,60	9,40	4,00	6,00	0,40	6,00	12,80	31,28	N/A	N/A	N/A	N/A
Desv. Est.	25,69	0,25	16,68	4,10	2,26	2,97	0,19	1,70	4,70	17,36	16,51	8,01	8,89	6,67
Varianza	659,83	0,06	278,31	16,78	5,12	8,81	0,04	2,87	22,12	301,39	272,58	64,19	79,04	44,53
Rango	107,90	1,21	64,63	17,29	8,35	9,80	0,70	8,04	15,22	70,20	62,86	31,77	32,40	24,99
Mínimo	28,00	7,58	27,87	3,01	3,65	6,00	0,30	3,14	12,58	30,67	20,55	11,36	22,51	13,41
Máximo	135,90	8,79	92,50	20,30	12,00	15,80	1,00	11,18	27,80	100,87	83,41	43,13	54,91	38,41

La secuencia de representación que se sigue de acuerdo con la fig. 2 es cationes Na⁺¹ > K⁺¹ > Mg⁺² > Ca⁺² y para aniones SO₄⁻² > Cl⁻ > HCO₃⁻ > CO₃⁻².

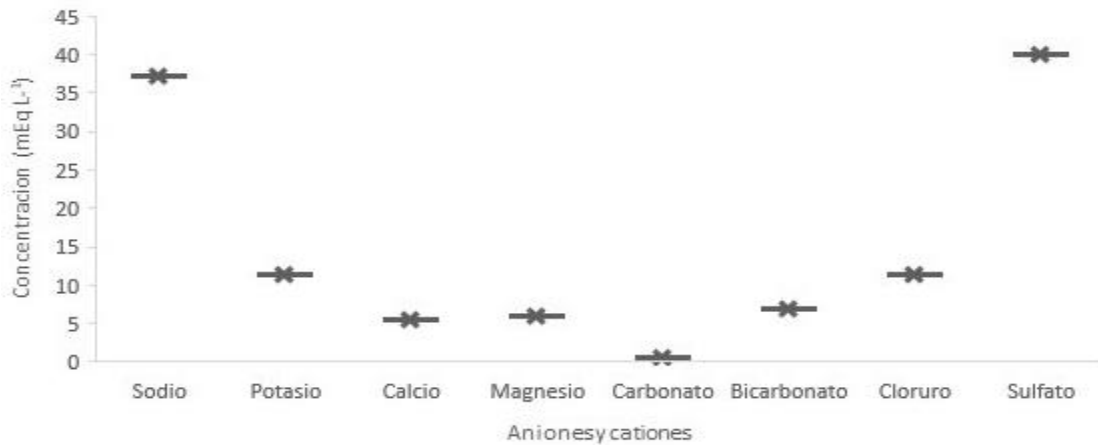


Fig. 2. Distribución de medias de aniones y cationes en unidades mEq L⁻¹.
Fig. 2. Distribution of anion and cation averages in mEq L⁻¹ units.

En este trabajo se encontró que el catión dominante fue sodio, por lo tanto, los coloides tendrán que absorber una proporción alta del mismo y dado que el efecto del sodio es el contrario al del calcio, habrá dispersión y no floculación. En este caso no se forman agregados y el suelo se mantiene disperso, siendo su permeabilidad baja y su aireación muy pobre (Navarro y Navarro, 2014). Eso explicaría la dispersión observada del suelo.

El anión sulfato es el más abundante en la zona de estudio su abundancia se debe a los procesos de intemperismo de minerales sulfatados con la subsecuente oxidación a sulfato y a la precipitación de yeso y anhidrita en evaporitas (Pacheco y Cabrera, 1996). Otro motivo racional es

por los procesos de salinización provocados por actividades antropogénicas ya que esta parcela es agrícola y se riega con agua de pozo de baja calidad agronómica.

El pH obtenido fue de (8.20) y la CE (65.47 dS m^{-1}) como se muestran valores estadísticos que reflejan las condiciones de suelos salinos-sódicos, y que es conocido del ex lago de Texcoco. La fig. 3 presenta la clasificación en tres intervalos de CE, en donde el intervalo más frecuente es de $28 - 63.9 \text{ dS m}^{-1}$. En suelos sódicos el sodio y el pH elevado provoca la precipitación del calcio y magnesio como carbonatos y la pérdida de la estructura del suelo, sin embargo, el suelo salino sódico presenta altas cantidades de sales solubles en el suelo (CE mayor a 4 dS m^{-1}). El pH no sobrepasa el valor de 8.5, no obstante, en algunas muestras las partículas están floculadas y los valores de pH sobrepasa al valor de 8.5. De acuerdo con los resultados obtenidos no se recomienda el lavado de sales ya que el calcio podría ser removido y ser remplazado por el sodio dando características de suelo sódico (Coras *et al.*, 2014). Por lo tanto, el desarrollo de los cultivos agrícolas en esta parcela es limitada por las condiciones del suelo antes mencionada. Algunos cultivos que se pueden establecer bajo estas condiciones del suelo son la alfalfa, cebada, trigo y girasol ya que son tolerantes a la salinidad (Aceves, 2011).

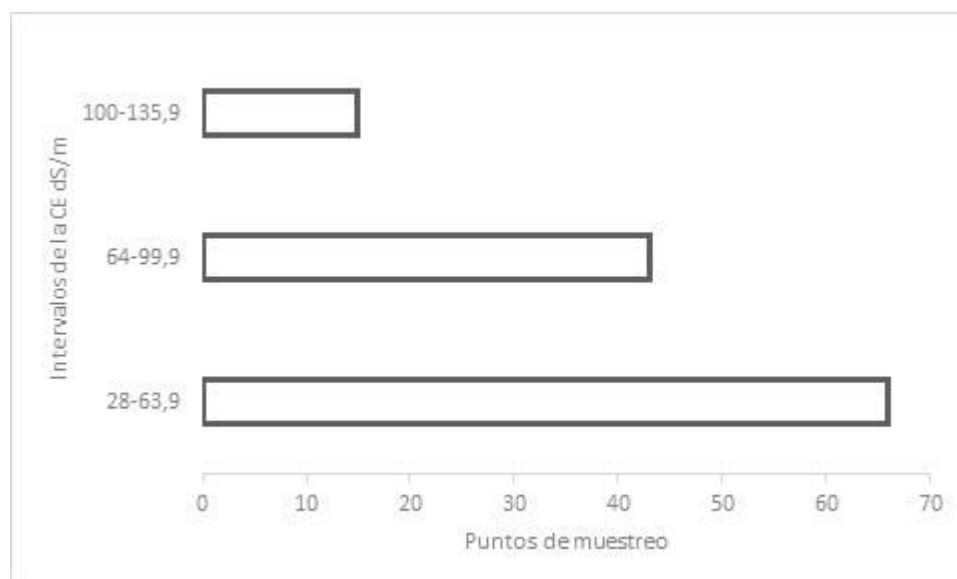


Fig. 3. Distribución de la CE en tres intervalos de medición.
Fig. 3. Distribution of the EC in three measurement intervals.

Los problemas salinos y sódicos no se limitan a zonas semiáridas o áridas, pueden también presentarse aún en regiones subhúmedas y húmedas en condiciones propicias (Gasca *et al.*, 2011), sino también en lagos secos de cuencas cerradas. Cuando el Na^{+1} es el catión dominante se produce

la dispersión de las arcillas, lo que lleva a una destrucción de la estructura. Además de que la hidrólisis de las arcillas sódicas, conduce a la alcalinización del perfil provocando una intensa alteración mineral, reflejándose en un perfil bien diferenciado desde el punto de vista morfológico (IUSS, 2007). La RAS de una determinada agua de riego, puede ser usada como medida de peligro de sodicidad de esta agua, cuando se tuviesen condiciones ideales de equilibrio (Amrhein y Suarez, 1991).

Existe diferencia notable en este estudio entre la RAS y la RAS ajustada, el valor mínimo de la RAS fue de 11 y de RAS ajustada de 21 y valores máximos fueron de 43 y 83 respectivamente, en cuanto a los rangos de cada una se observó un aumento significativo en la RAS ajustada. Los principales factores que afectan los valores de la RAS del suelo, son la pérdida o ganancia en contenidos de calcio y de magnesio debido a la precipitación o disolución de carbonatos alcalino-térreos (Amrhein y Suarez, 1991). Mientras que la RAS ajustada, se ajusta a la concentración de calcio en el agua, al valor de equilibrio esperado después del riego, además se incluyen los efectos del bióxido de carbono, bicarbonato y la salinidad sobre el calcio originalmente contenidos en el suelo (Bower *et al.*, 1968.). Agrosal (2019) menciona que los minerales carbonatados presentan un efecto protector en la estructura del suelo.

En el PSI se encontró valor mínimo de 13 y 38 el máximo, mientras, que en el PSI ajustado fue de 23 el mínimo y 55 el valor máximo, por lo tanto, se encontró diferencia estadísticamente significativa. La concentración en el Na^{+1} se puede medir en la disolución del suelo o en el complejo de cambio. En el suelo es muy importante determinar qué tipo de cationes predominan en el complejo adsorbente si es el Ca^{+2} o el Na^{+1} . Se considera que un suelo puede empezar a sufrir problemas de sodificación y dispersión de la arcilla cuando el $\text{PSI} > 15\%$. (Edafología, 2019).

En las interpolaciones y curvas de nivel (figs. 4 y 5) se ven reflejadas las distribuciones de PSI-RAS con mayor intensidad en seis zonas más claras en los rangos de 33-43 de RAS y 30-38 de PSI. En el caso de RAS ajustada fueron siete zonas claras en el rango de 63-83 y 45-55 de PSI ajustada, en donde se encontró mayor concentración del ion sodio. Lo que denota el riesgo potencial de sodicidad de estos suelos. Mientras que las zonas más oscuras muestran menor concentración de sales solubles. En los suelos sódicos, las partículas de arcilla tienden a separarse. Este proceso de disociación técnicamente se denomina dispersión. Las fuerzas que mantienen unidas a las partículas de arcilla se interrumpen por los iones de Sodio (Smart-fertilizer, 2019). Las imágenes dan una visión artificial de las concentraciones de RAS y PSI de la parcela.

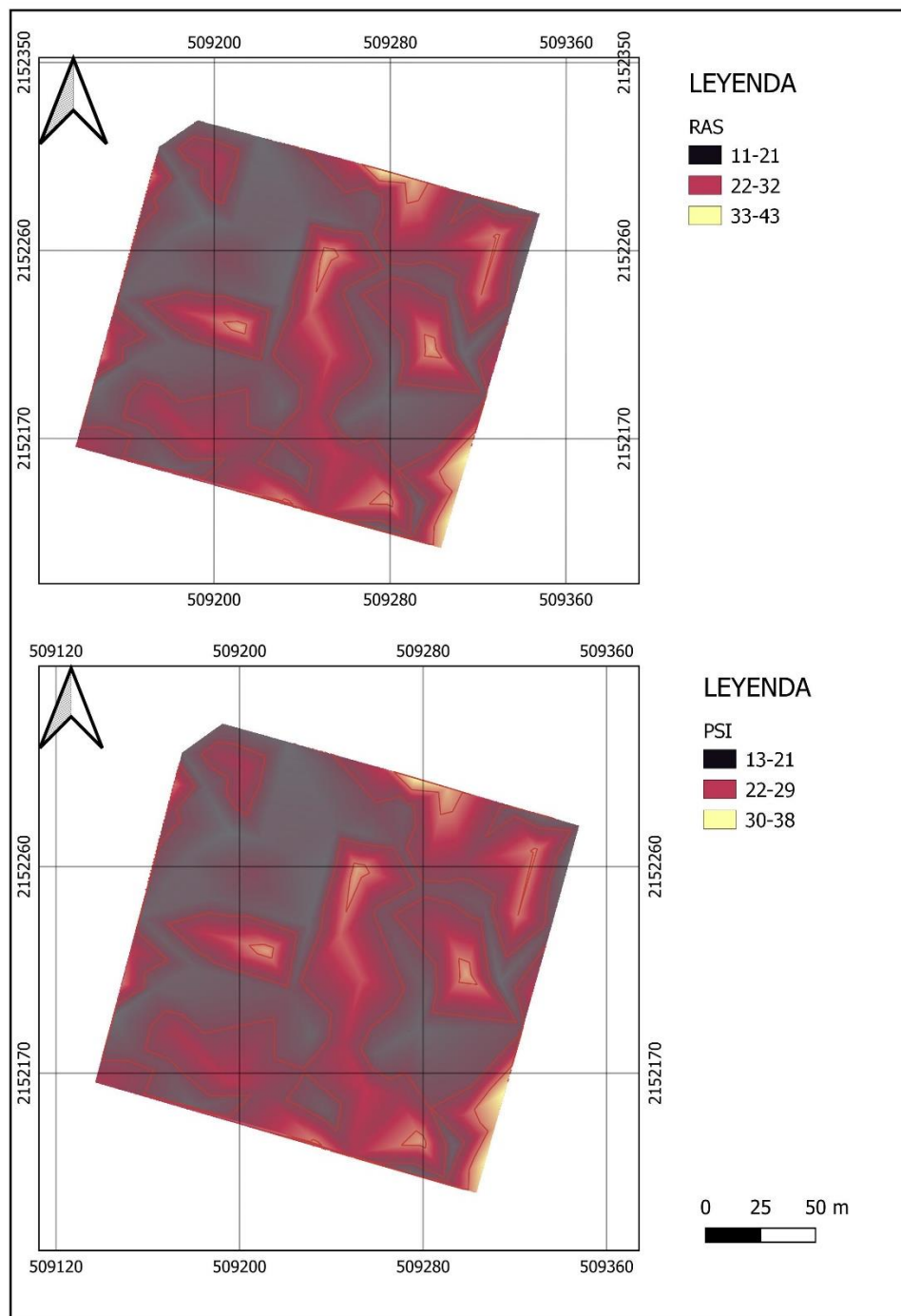


Fig. 4. Mapa de la parcela con interpolación y curvas de nivel para RAS y PSI.
Fig. 4. Plot map with interpolation and contour lines for SAR and ESP.

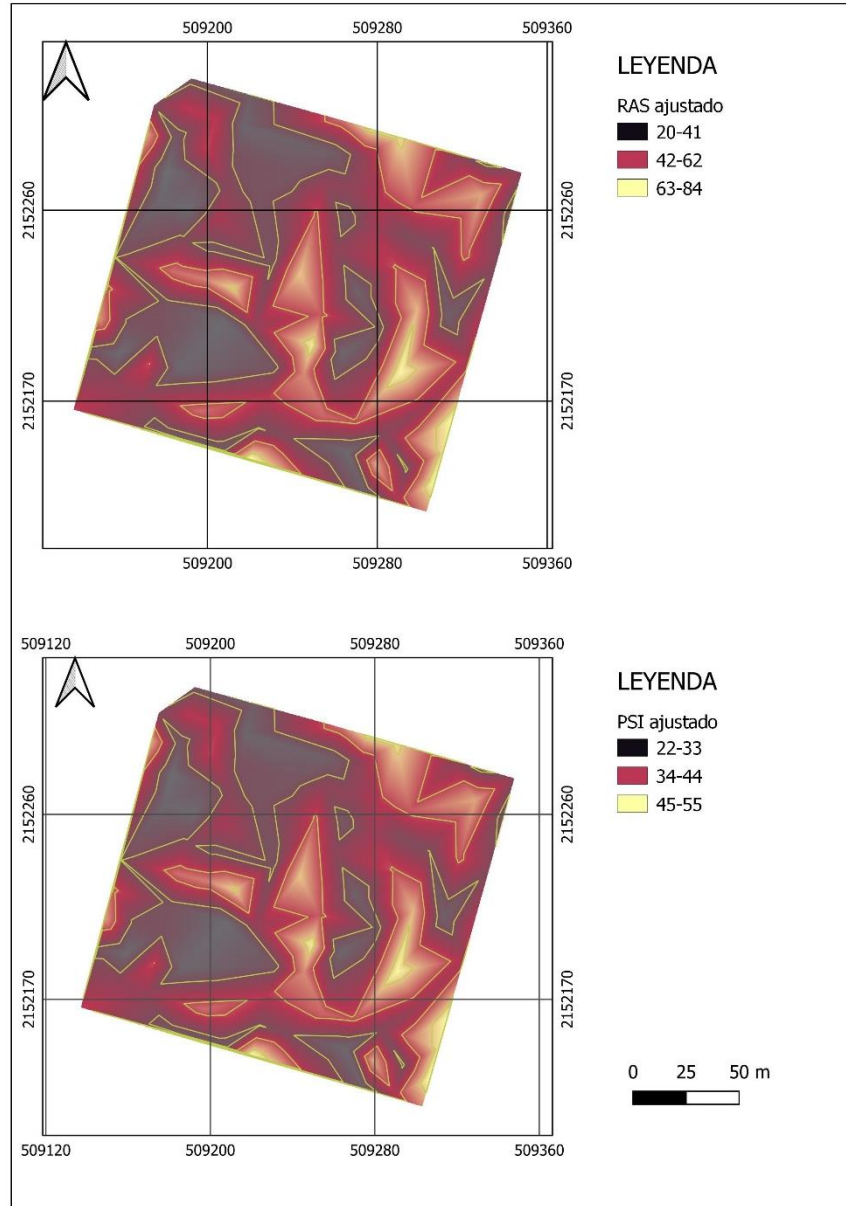


Fig. 5. Mapa de la parcela con interpolación y curvas de nivel para RAS ajustado y PSI ajustado.
Fig. 5. Plot map with interpolation and contour lines for adjusted SAR and adjusted ESP.

En general la parcela estudiada presenta valores elevados de RAS-PSI, debido a las condiciones del ex lago de Texcoco y también en menor medida por el agua de riego, por lo que pueden dejar de ser productivos y se convierten en eriales cuyo abandono genera salinización, lo que conlleva un daño ambiental, económico y social (Sánchez *et al.*, 2012).

Los valores más bajos de sodio y de la RAS corresponden al rango de CE de 28 a 63.9 dS m⁻¹ y los más elevados al rango de CE de 100 a 135.9 dS m⁻¹, caso similar al reportado por (Bosch *et al.*, 2012) que encontró al ion sodio y la RAS en los valores bajos, correspondientes al rango

bajo de CE. Analizando las medias de CE, PSI y pH, se pudo definir el predio como salino sódico ($CE \text{ dS m}^{-1} > 4$; $PSI > 15$ y $pH < 8.5$) (Aceves, 2011).

En las figs. 6 y 7 se presentan las relaciones funcionales entre el porcentaje de sodio intercambiable y la relación de adsorción de sodio explícita y ajustada. Con valores de $K = 0.0118614$ y $K = 0.0168999$ que representan los coeficientes de selectividad de Gapon para textura de suelos arcillosos-limosos y arcillosos. Se considera importante la relación y variación del PSI en los suelos agrícolas por ser regados con aguas de distintos valores de RAS (López *et al.*, 2016,). Las variaciones en los coeficientes de selectividad bajo condiciones de equilibrio en el suelo, se explican por la no homogeneidad de carga, cambio en los coeficientes de actividad de los cationes con el incremento del grado de saturación y presencia de mezclas de distintos tipos de materiales intercambiadores de cationes en el suelo (Aceves, 2011).

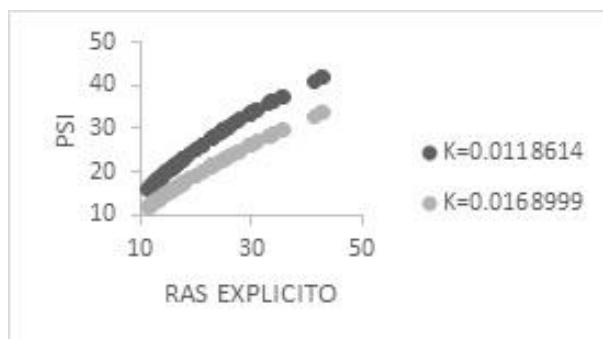


Fig. 6. Relaciones funcionales de PSI-RAS.
Fig. 6. Functional relationships of ESP-SAR.

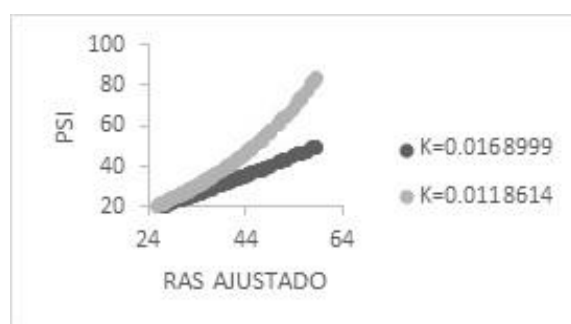


Fig. 7. Relaciones funcionales de PSI-RAS ajustado.
Fig. 7. Functional relationships of ESP-SAR adjusted.

Los resultados de clasificación de RASaj, RAS y CE mostraron, en todas las muestras, pertenecer únicamente a la clasificación C4 y la clasificación S1 mostró variaciones en sus cuatro formas que representan de baja a alta concentración en el ion sodio. En la tabla 2 se presentan las muestras

analizadas y su clasificación. Se observa variación considerable en el número de muestras analizadas pertenecientes a las variables de RAS y RAS ajustado a excepción de la clasificación C4-S3 donde la variación es mínima. Lo que demuestra que si hay un resultado diferente entre RAS y RAS ajustado en la clasificación del diagrama de (Richards, 1982). Analizando el porcentaje de clasificaciones se notan los porcentajes mayores obtenidos que son 41.6 % para C4-S2 con RAS y 60.89 % para C4-S4 con RAS ajustado lo que representa una diferencia de importancia. Otro aspecto encontrado en este estudio fue el RAS ajustado, el cual se orienta más hacia el peligro de muy alta sodicidad en el terreno, mientras que el RAS explícito se orienta a menos sodicidad, esto es debido a la distribución de cationes en su composición y al efecto del Na^+ es mayor que el del Ca^{+2} y Mg^{+2} en la ecuación con raíz cuadrada del cálculo de la RAS y que la RAS ajustado se ajusta la concentración de calcio en la solución del suelo al valor de equilibrio esperado y al efecto del CO_2 y HCO_3^- (Bosch *et al.*, 2012). Una investigación de suelos elaborada por (Pérez *et al.*, 2013) en el Colegio de Postgraduados mostraron alta concentración de Na^+ , CO_3^{-2} , Cl^- y SO_4^{2-} , así como CE elevada además obtuvieron valores de RAS y PSI elevados, concluyendo que son suelos salino-sódicos estos resultados concuerdan con los estudios de este trabajo debido a la cercanía del lugar y que ambos trabajos se llevaron a cabo en temporada seca ya que si el contenido de humedad es bajo presentará salinidad en las capas superficiales.

Tabla 2. Clasificación de la solución del suelo con base en la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) y la Conductividad Eléctrica (CE).

Table 2. Classification of the soil solution based on the Sodium Adsorption Ratio (SAR) and the Electrical Conductivity (EC).

Clasificación	CE a 25°	Intervalo	Número de muestras	
	$\mu\text{mhos cm}^{-1}$	RAS	RAS	RASaj
C4-S1: Muy alta salinidad, baja en sodio		0-10	40	10
C4-S2: Muy alta salinidad, media en sodio		10-18	65	30
C4-S3: Muy alta salinidad, alta en sodio	> 2250	18-26	24	21
C4-S4: Muy alta salinidad, muy alta en sodio		> 26	27	95

Se encontraron 38 y 118 muestras en la solución del suelo catalogadas como condicionadas y no recomendables respectivamente para salinidad efectiva, en el caso de salinidad potencial se encontraron que 8 muestras son de valoración condicionada y 148 son no recomendables (tabla 3). En ambos índices de salinidad la mayoría de las muestras tienen restricción de uso, lo que significa más salinidad en el terreno de estudio por la precipitación de sales menos solubles como el CaCO_3 , MgCO_3 y CaSO_4 . Castellón *et al.* (2015) mencionan que donde hubo cuerpos de aguas superficiales estas pueden dejar un alto contenido de sales que pueden migrar hacia las capas inferiores y aumentar la salinidad del suelo.

Tabla 3. Parámetros de Salinidad Efectiva (SE) y Salinidad Potencial (SP) de la zona de estudio.
Table 3. Parameters of Effective Salinity (ES) and Potential Salinity (PS) of the study area.

Valoración	Concentración mEq L ⁻¹	Número de muestras	
		SP	SE
Condicionada	3-15	8	38
No recomendable	>15	148	118

En este terreno es posible realizar acciones de restauración de suelos salinos, Zambrana (2020) recomienda la aplicación de enmiendas de estiércol de bovinos para la disminución de pH, CE, RAS y PSI, lo que conlleva una disminución significativa de estos índices; además de que incrementaron la respiración potencial del suelo.

Conclusiones

En el suelo analizado el catión dominante fue el sodio y el sulfato como anión dominante, por lo que, los resultados indican que el terreno es salino-sódico y presenta problemas en varios sitios de sodio alto con la posibilidad de sodicidad en toda el área del terreno.

En la comparación de los índices existen diferencias significativas entre RAS y RAS ajustado, pero, no existe diferencia de importancia entre el PSI y el PSI calculado con la RAS ajustado ya que cada índice lleva diferente procedimiento de cálculo siendo RAS-PSI ajustada la que involucra más variables de cálculo por lo que puede ser mejor opción sin embargo no se recomienda el uso de un índice de salinidad en específico.

Las imágenes interpoladas y las curvas de nivel dan una visión artificial de la RAS, PSI, RAS ajustado y PSI calculado con RAS ajustado en el terreno de esta manera se pueden determinar las zonas con mayor y menor problema de sodicidad que le servirá al productor para tomar una mejor decisión.

La zona de estudio del ex lago de Texcoco presenta suelos de textura arcillosos-limosos y arcillosos y sus coeficientes de selectividad de Gapon respectivos son $K_G = 0.0118614$ y $K_G = 0.0168999$.

En cuanto a la clasificación RAS-CE en la mayoría de los casos presentan suelos de salinidad muy alta y sodicidad media (C4-S2) y en menor cantidad suelos de muy alta salinidad y alta sodicidad (C4-S3), para RAS ajustada – CE, presenta en la mayoría de las muestras suelos de salinidad muy alta y sodicidad muy alta (C4-S4) y en menor cantidad suelos de salinidad muy alta y sodicidad baja (C4-S1).

Con respecto a la salinidad efectiva y potencial de los muestreos de suelo indican que no son recomendables y la minoría son condicionadas para su uso agrícola.

De antemano se sabe la problemática del suelo de la zona de estudio, sin embargo, es importante conocer las condiciones in situ de los valores de salinidad y sodicidad ya que este terreno se utiliza para cultivos de forrajes. Con esta información se sabe en qué zonas no es recomendable con fines agrícolas por lo tanto nos lleva a establecer cultivos más tolerantes a la salinidad. También este estudio se puede replicar en otros terrenos con problemas de salinidad y sodicidad.

Referencias

- Aceves Navarro, E. (2011). *El ensalitramiento de los suelos bajo riego*. México. Biblioteca Básica de Agricultura.
- Agrosal. *La salinidad en la agricultura* (17 de mayo 2019). <http://agrosal.ivia.es/>
- Amrhein, C. y Suarez, D. L. (1991). Sodium-calcium exchange with anion exclusion and weathering corrections. *Soil Science Society of America Journal*. (55)698-706. <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1991.03615995005500030010x>.
- Bohn, H., Myer, R. A., McNeal, B. L. y O'Connor, G. A. (2001). *Soil chemistry*. New York. John Wiley and Sons Hoboken.
- Bosch, M. M., Costa, J. L., Cabria, N. F. y Aparicio, V. C. (2012). Relación entre la variabilidad espacial de la conductividad eléctrica y el contenido de sodio del suelo. *Ciencia del suelo de Argentina*. 30 (2), 95-105. https://www.researchgate.net/profile/Virginia_Aparicio3/publication/285773017_Relationship_between_spatial_variability_of_electrical_conductivity_and_soil_sodium_content/links/5b97ef60a6f

[dcc59bf85db21/Relationship-between-spatial-variability-of-electrical-conductivity-and-soil-sodium-content.pdf](https://doi.org/10.1007/s11356-019-0599-1).

- Bower, C. A., Ogata, G. y Tucker, J. M. (1968). Sodium Hazard of Irrigation waters as influenced by leaching fraction and by precipitation or solution of calcium carbonate. *Soil Science*, 106 (1), 29-34.
https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1968/07000/SODIUM_HAZARD_OF_IRRIGATION_WATERS_AS_INFLUENCED.5.aspx?O2x
- Can Chulim, A. (2011). *Calidad de las aguas para riego en la cuenca del oriental y sierra norte, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz*. (Tesis de doctorado). Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, campus Montecillo.
- Carranza, A. E. (2018). Correlación litológica del subsuelo del lago de Texcoco. *Hidrobiológica*. 28(1), 93-101.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972018000100093
- Castellón, G. J. J., Bernal, M. R., y Hernández, R. M. L. (2015). Calidad del agua para riego en la agricultura protegida en Tlaxcala. *Ingeniería*. 19(1), 39-50.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46750924004>
- Clesceri, L. S., Greenberg, A. E. y Eaton, A. D. (1998). *Estándar methods for examination of water and wastewater*. Baltimore. American Public Health Association (APHA).
- Coras, M. P. M., Ontiveros, R. C. y Diakite, L. D. (2014). Movimiento del agua freática y concentración de sales en suelos agrícolas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(4), 537-548.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342014000400001&script=sci_arttext
- Edafología. Tema 12. *Contaminación por sales solubles*. (15 de mayo 2019).
<http://www.edafologia.net/conta/tema12/medida.htm>
- Escobar, V. B. S. y Palacios, V. O. L. (2012). Análisis de la sobreexplotación del acuífero Texcoco, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(2), 67-84.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222012000200005&script=sci_arttext
- Espinosa, C. M. (2008). Procesos y actores en la conformación del suelo urbano en el ex lago de Texcoco. *Economía, Sociedad y Territorio*, 8(27), 769-798.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S140584212008000200009&script=sci_abstract&tlng=en

- Etchevers, B., J. D., Hidalgo, M., Parat, C., y Quantin, P. (2006). *Manejo agronómico de suelos endurecidos (tepetales) del Eje Neovolcánico de México*. Ciudad de México: Marcel Dekker.
- Gasca, C. A., Menjivar, J. C y Torrente, A. T. (2011). Cambios en el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la relación de absorción de sodio (RAS) de un suelo y su influencia en la actividad y biomasa microbiana. *Acta Agronómica*, 60(1), 27-38. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/21155/22124
- Gutiérrez, C. M. C., Stoops, G. G. y Ortiz, S. C. A. (1998). Carbonato de calcio en los suelos del ex lago de Texcoco. *Terra Latinoamericana*, 16(1), 11-19. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57316102.pdf>
- IUSS (International Union of Soil Sciences) (2007). *Base referencial mundial del recurso suelo. Primera actualización. Informes sobre recursos mundiales de suelos*. No. 103. FAO, Roma. Italia. <http://www.fao.org/3/a0510s/a0510s00.pdf>
- López, G. A. D., Ortega, E. H. M., Ramírez, A. C., Sánchez, B. E. I., Can, C. A., Gómez, M. D. J. y Vázquez, A. R. E. (2016). Caracterización fisicoquímica del agua residual urbano-industrial y su importancia en la agricultura. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(6),139-157. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000600139
- Mancilla, V. O. R., Anzaldo, C. B. N., Guevara, G. R. D., Hernández, V. O., Palomera, G. C., Figueroa, G. Y., Ortega, E. H. M., Flores, M. H., Can, C. A., Cruz, C. E., Sánchez, B.E. I., Olguín, L. J. L. y Mendoza, S. I. (2021). Calidad del agua subterránea para uso agrícola en Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro, México. *Terra Latinoamericana*, (39) e745. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.745>
- Medina, O. L. E., García, C. N. E. García, O. F. e Ikkonen, E. (2014). Suelos de humedal del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 111-124. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000500007
- Navarro, G. G. y Navarro, G. S. (2014). *Fertilizantes: química y acción*. Madrid. Mundi-Prensa.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis. Diarios Oficial de la Federación. Segunda sección. 2002. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=717582&fecha=31/12/2002

- Pacheco, J. y Cabrera, A. (1996). Efecto del uso de fertilizantes en la calidad del agua subterránea en el estado de Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán. *Ingeniería Hidráulica en México*, 10(1), 53-60.
- Pajares, M.S., Gallardo, L. J. F. y Etchevers, B. J. D. (2010). Indicadores bioquímicos en suelos de un transecto altitudinal en el eje neovolcánico mexicano. *Agrociencia*, (44), 261-274.
- Pérez, D. J. P., García, D. Y. B., Terrazas, M. L., Ramírez, A. C. y Ortega, E. H. M. (2013). *Composición y caracterización química del suelo: indicadores de salinidad y sodicidad*. Presentado en el Congreso Nacional de Irrigación, Puerto Vallarta, Jalisco, México. NUS009. 1-8.
- QGIS. (Complementos de interpolación). (4 de septiembre de 2019). https://docs.qgis.org/2.14/es/docs/user_manual/plugins/plugins_interpolation.html
- Richards, L. A. (1982). *Suelos Salinos y Sódicos*. México. Limusa.
- Sánchez, B. E. I., Ortega, E. H. M., Sandoval, O. G. T., Hernández, V. R. A. y Estrada, V. C. (2012). Lavado de sales en suelos aluviales costeros de Oaxaca, México, con aguas residuales municipales tratadas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(4), 343-360
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000400010
- Segura, C. M. A., Gutiérrez, C. M. C., Ortiz, S. C. A. y Gómez, D. D. J. (2000). Suelos arcillosos de la zona oriente del estado de México. *Terra*, 18(1), 35-44.
<https://www.redalyc.org/pdf/573/57318104.pdf>
- Smart-fertilizer. *Suelos sódicos y su manejo*. (15 de mayo 2019). <https://www.smart-fertilizer.com/es/articles/sodic-soils>
- Velázquez, M. A., Ortega, M., Martínez, A., Kohashi, J. y García, N. (2002). Relación funcional PSI-RAS en aguas residuales y suelos del valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Terra Latinoamericana*, 20(4), 459-464.
- Zebrowski, C. (1992). Los suelos volcánicos endurecidos de América Latina. *Terra*, 10, 15-23.
http://horizon.documentation.ird.fr/exldoc/pleins_textes/pleins_textes_7/divers2/38562.pdf
- Zambrana, Y. N. (2020). *Aplicación de enmiendas orgánicas y yeso para la remediación de suelos salinos-sódicos, bajo condiciones controladas*. Tesis de maestría. Universidad Mayor de San Simón. <http://ddigital.umss.edu.bo:8080/jspui/handle/123456789/20590>