

Propiedades químicas del suelo y calidad del agua en Miahuatlán de Porfirio Díaz y Ejutla de Crespo, Oaxaca, México

Soil chemical properties and water quality at Miahuatlán de Porfirio Díaz and Ejutla de Crespo, Oaxaca, Mexico

William Zárate-Martínez^{1*}, Moisés Felipe-Victoriano², Fernando Edgar Martínez-Silva³, Karina Móreno-León⁴, José Luis Arispe-Vázquez⁵, José Francisco Díaz-Nájera⁶

¹Campo Experimental Saltillo, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Carretera Saltillo-Zacatecas km 342+119 No. 9515, Col. Hacienda de Buenavista, CP. 25315, Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México.

²Campo Experimental Las Huastecas (CEHUAS), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Carretera Tampico-Mante km 55, CP. 89610, Villa Cuauhtémoc, Tamaulipas.

³Campo Experimental Valles Centrales de Oaxaca, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Melchor Ocampo No. 7, Col. Santo Domingo Barrio Bajo, Etlá, CP. 68200, Oaxaca, México.

⁴Departamento de Botánica, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro No. 1923, Col. Buenavista, CP. 25315, Saltillo, Coahuila. México.

⁵Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Km 2.5 Carretera Iguala-Tuxpan, Colonia Centro Tuxpan CP. 40000, Iguala de la Independencia, Guerrero, México.

⁶Colegio Superior Agropecuario del Estado de Guerrero, Fitotecnia. Av. Vicente Guerrero 81, Centro, CP. 40000 Iguala de la Independencia, Guerrero, México.

*Autor de correspondencia: zarate.william@inifap.gob.mx

Nota científica

Recibida: 15 de noviembre 2023

Aceptada: 05 de enero 2024

RESUMEN. La investigación se realizó en el ciclo 2020, con el objetivo de determinar las características químicas del suelo y calidad del agua en los municipios de Miahuatlán de Porfirio Díaz y Ejutla de Crespo, Oaxaca, México. Se muestreo el suelo y agua, se determinó contenido de cationes, aniones y variables de calidad del agua. En el suelo se registró alta concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} con valores promedio de hasta 19.20 y 19.42 mEq L^{-1} respectivamente. En el agua se registró alta concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y HCO_3^- con valores promedio de hasta 4.79, 4.32 y 7.97 mEq L^{-1} respectivamente. Según las variables SP, RAS, IS y CSR el agua se clasifica como adecuada para riego. Se concluye que el uso de ácidos es necesario para bajar el pH del agua y neutralizar los carbonatos.

Palabras clave: Aniones, carbonatos, cationes, salinidad, solución nutritiva.

ABSTRACT. The research was performed in the cycle 2020, with the objective of determining the chemical characteristics of the soil and water quality in the municipalities of Miahuatlán de Porfirio Díaz and Ejutla de Crespo, Oaxaca, Mexico. The soil and water were sampled, the content of cations, anions and water quality variables were determined. High concentrations of Ca and Mg were recorded in the soil with average values of up to 19.20 and 19.42 mEq L^{-1} respectively. High concentrations of Ca^{2+} , Mg^{2+} and HCO_3^- were recorded in the water with average values of up to 4.79, 4.32 and 7.97 mEq L^{-1} respectively. According to the variables SP, RAS, IS and CSR, the water is classified as suitable for irrigation. It is concluded that the use of acids is necessary to lower the pH of the water and neutralize the carbonates.

Keywords: Anions, carbonates, cations, salinity, nutrient solution.

Como citar: Zárate-Martínez W, Felipe-Victoriano M, Martínez-Silva FE, Móreno-León K, Arispe-Vázquez JL, Díaz-Nájera JF (2024) Propiedades químicas del suelo y calidad del agua en Miahuatlán de Porfirio Díaz y Ejutla de Crespo, Oaxaca, México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 11(1): e3948. DOI: 10.19136/era.a11n1.3948.

INTRODUCCIÓN

Como parte de la política de apoyo al sector agrícola, en el ciclo 2019 la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural del gobierno federal de México, implementó el Programa de Desarrollo Territorial (PRODETER), cuyo objetivo fue mejorar la producción, rentabilidad y sustentabilidad de las Unidades de Producción Familiar (UPF) (SADER 2019). En todo el territorio mexicano, según criterios agroecológicos y sociales, se definieron territorios prioritarios. En el estado de Oaxaca, el territorio prioritario Ejutla de Crespo, abarcó los municipios de Ejutla de Crespo y Miahuatlán de Porfirio Díaz, con las cadenas productivas: maíz, hortalizas y *Agave* mezcalero (SADER 2019). La producción de hortalizas en el territorio prioritario Ejutla de Crespo es en suelo, a campo abierto o invernaderos de baja tecnología. Generalmente, los agricultores siembran variedades nativas, en el caso de chile *Capsicum annuum* L. (Solanaceae) están reportadas las siguientes poblaciones: piquín, tusta, de agua y tabiche (Cruz-Andrés et al. 2018). Según datos del SIAP (2020) en Ejutla de Crespo las principales hortalizas que se cultivan son: tomate rojo (42 ha), chile verde (24 ha), calabacita (17 ha) y tomate verde (9 ha) con rendimientos de 208.5, 7.2, 11.4 y 9.5 t ha⁻¹, respectivamente; en Miahuatlán de Porfirio Díaz las principales hortalizas que se producen son: ajo (17 ha), tomate verde (16 ha), tomate rojo (10 ha) y calabacita (8 ha) con rendimientos de 6.7, 9.8, 145.1 y 11.7 t ha⁻¹ respectivamente.

En la agricultura hay un incremento constante en el consumo de fertilizantes y se prevé que para el ciclo 2030 el consumo de fertilizantes nitrogenados llegará a 180 millones de toneladas (Grahmann et al. 2013), no obstante, el impacto ambiental asociado al uso inapropiado y el constante incremento en los precios motiva el uso eficiente de los fertilizantes (Stewart 2007). Para la buena nutrición de un cultivo, es importante ofrecerle los elementos esenciales para un óptimo desarrollo de acuerdo con las condiciones del suelo y el agua de riego (Favela-Chávez et al. 2006). En agricultura protegida, es indispensable conocer los aspectos fundamentales para formular soluciones nutritivas, tales como: el pH, la concentración iónica total, determinada mediante la conductividad eléctrica; la relación mutua entre aniones, y cationes, la concentración de amonio y carbonatos (Favela-Chávez et al. 2006). La conductividad eléctrica (C.E.) y el pH del suelo, proporcionan información básica sobre la disponibilidad de nutrientes para los cultivos en el suelo (Ramírez et al. 2022). Por lo anterior, el objetivo de la investigación fue determinar las características químicas del suelo y calidad del agua en los municipios de Miahuatlán de Porfirio Díaz y Ejutla de Crespo, Oaxaca, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El muestreo de suelo y agua se realizó en los municipios de Miahuatlán de Porfirio Díaz y Ejutla de Crespo, los cuales, se ubican al sur de la región Valles Centrales de Oaxaca, México, dentro de las coordenadas geográficas: 16° 13' y 16° 44' latitud norte y 96° 25' y 96° 53' longitud oeste. Se seleccionaron cuatro sitios de muestreo: a) (GZC) Guixé, Zona Centro, Miahuatlán de Porfirio Díaz, Oaxaca; b) (GZS) Guixé, Zona Sur, Miahuatlán de Porfirio Díaz, Oaxaca; c) (HV) Hacienda Vieja, Ejutla de Crespo, Oaxaca y d) (LNS13) La Noria Sección 13, Ejutla de Crespo, Oaxaca. La temperatura

promedio oscila entre 13 a 28 °C, la precipitación entre 568 a 698 mm y se encuentran a una altitud de 1 300 a 1 600 msnm (SMN 2020). Con clima semiseco semicálido (INEGI-CONAFOR 2013). Predominan los suelos clasificados como Cambisol (37%), Regosol (25.5%) y Luvisol (24.8%); los cuales, cubren más del 85% del territorio (INEGI 2016).

Muestreo y análisis de suelo

El muestreo de suelo se realizó el 28 de febrero de 2020, en parcelas de productores de hortalizas. En cada sitio de muestreo se recolectaron cuatro muestras de suelo, cada una compuesta por 20 submuestras, las cuales, se obtuvieron a una profundidad de 0-30 cm (capa arable), se retiraron restos de materia orgánica, piedras y terrones, cada muestra se guardó y etiquetó en bolsas limpias siguiendo lo recomendado por Lizcano *et al.* (2017). La preparación de la muestra de suelo se realizó según el método AS-01 y la obtención del extracto de saturación según el método AS-16 (SEMARNAT 2002). Se determinó pH (SE 2016). La conductividad eléctrica (C.E.) se realizó con un conductímetro y se expresó en (dS m⁻¹) según el método AS-18. La determinación de la relación de adsorción de sodio (RAS) se realizó por el método AS-21. Se aplicó la ecuación propuesta por Suárez (1981).

$$(RAS) (dS m^{-1}) = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

Dónde: RAS = Relación de Adsorción de Sodio (dS m⁻¹); Na⁺ = Sodio; Ca²⁺ = Calcio y Mg²⁺ = Magnesio.

La determinación de cationes (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺) se realizó según el método AS-19; la determinación de aniones cloruros Cl⁻, carbonatos (CO₃²⁻) y bicarbonatos (HCO₃⁻) se realizó por titulación volumétrica, la determinación del sulfato (SO₄²⁻) se realizó por turbidimetría, los resultados se expresaron en (mEq L⁻¹) (SEMARNAT 2002).

Muestreo y análisis de agua

El muestreo de agua se realizó el 28 de febrero de 2020. Las muestras se recolectaron de la fuente de agua de 16 productores. En cada sitio de muestreo se obtuvieron cuatro muestras, cada muestra se guardó en un envase limpio con capacidad de 1 L. Al recolectar el agua se revisó que esta fuera homogénea y que no presentará materiales extraños. Los envases se etiquetaron y guardaron en bolsas limpias siguiendo lo indicado por Lizcano *et al.* (2017). Para el análisis, la medición de la C.E. del agua se realizó por triplicado (SINEC 2018). También se determinó el pH (SINEC 2016). Se calculó la RAS con la ecuación propuesta por USSL (1954) y Suárez (1981). Debido a la alta concentración de iones en el agua, principalmente bicarbonatos y calcio se calculó la RAS ajustado (Lesch y Suarez 2009). Se midieron las siguientes variables: dureza en agua por titulación (SINEC 2001b), Cl⁻ (SINEC 2001c), NO₃⁻ (SINEC 2001a), Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, SO₄²⁻, HCO₃⁻ y CO₃²⁻ (Rice *et al.* 2012).

Calidad de agua

El pH del agua se clasificó en: fuertemente ácida (menor de 5), moderadamente ácida (5.1-6.5), neutra (6.6-7.3), medianamente alcalina (7.4 a 8.5) y fuertemente alcalina (mayor de 8.5). El agua de riego debe tener un pH entre 5.5 y 6.5, en ese rango la mayoría de los iones se encuentran

disponibles para las plantas (Steiner 1968). La concentración total de sales solubles se expresa como C.E. y se divide en cuatro clases: agua de salinidad baja (C1: $< 0.25 \text{ mS cm}^{-1}$), agua de salinidad media (C2: $0.25\text{-}0.75 \text{ mS cm}^{-1}$), agua de salinidad alta (C3: $0.75\text{-}2.25 \text{ mS cm}^{-1}$) y agua de salinidad muy alta (C4: $> 2.25 \text{ mS cm}^{-1}$) (Richards 1990).

La salinidad efectiva (SE) estima el riesgo de las sales solubles en el agua de riego al pasar a formar parte de la solución del suelo, debido a que considera la precipitación de sales menos solubles (CaCO_3 , MgCO_3 y CaSO_4). El valor de la SE indica la cantidad de sales que quedarán en la solución del suelo y serán las potencialmente nocivas para los cultivos. La SE fue calculada según las siguientes ecuaciones expresadas en mEq L^{-1} .

$$\text{Si } \text{Ca}^{2+} > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$$

$$\text{SE} = \Sigma \text{ de cationes} - (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}).$$

$$\text{Si } \text{Ca}^{2+} < (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) \text{ pero } \text{Ca}^{2+} > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-).$$

$$\text{SE} = \Sigma \text{ de cationes} - \text{Ca}^{2+}.$$

$$\text{Si } \text{Ca}^{2+} < (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) \text{ pero } \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$$

$$\text{SE} = \Sigma \text{ de cationes} - (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-).$$

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

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

Valores de SE en el agua $< 3 \text{ mEq L}^{-1}$ es apta para riego, de 3 a 15 mEq L^{-1} el agua es apta con precauciones y $> 15 \text{ mEq L}^{-1}$ no es apta para riego (Doneen 1958).

La salinidad potencial (SP) es un índice para estimar el peligro que representan los cloruros y parte de los sulfatos del agua en el suelo, ya que cuando el suelo presenta valores de humedad aprovechable inferiores al 50% aumenta considerablemente la presión osmótica. Valores menores de 3 mEq L^{-1} el agua es de buena calidad, de 3 a 15 mEq L^{-1} el agua está condicionada y mayor de 15 mEq L^{-1} no es recomendable para riego. Este índice se calcula con la siguiente fórmula (Doneen 1958):

$$SP (\text{mEqL}^{-1}) = \text{Cl}^{-1} + \frac{\text{SO}_4^{2-}}{2}$$

Donde: SP = Salinidad potencial en mEq L^{-1} ; Cl^- = Cloro y SO_4^{2-} = Sulfato.

La relación de adsorción de sodio (RAS) es un índice efectivo del peligro potencial de un agua en equilibrio con el suelo. Cuando el agua contiene cantidades considerables de sodio en solución, éste se acumula paulatinamente en el suelo y como consecuencia, el suelo se deflocula y pierde su estructura. El contenido de sodio en el agua se clasifica según los valores de RAS: S1: agua baja en sodio ($0\text{-}10 \text{ dS m}^{-1}$); S2: agua media en sodio ($10\text{-}18 \text{ dS m}^{-1}$); S3: agua alta en sodio ($18\text{-}26 \text{ dS m}^{-1}$) y S4: agua muy alta en sodio ($> 26 \text{ dS m}^{-1}$) (Richards 1990).

En aguas con altas concentraciones de iones bicarbonato, existe la posibilidad de que el calcio y el magnesio se precipiten en forma de carbonatos. El carbonato de sodio residual (CSR) se calcula con la siguiente fórmula. $\text{CSR} = (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ se expresan en mEq L^{-1} . Agua con un valor $< 1.25 \text{ mEq L}^{-1}$ se clasifica como de buena calidad, entre 1.25 y 2.5 mEq L^{-1} como condicionada y > 2.5 como no recomendable. Cuando la diferencia es negativa no existe problema y el valor de CSR se supone igual a cero. Cuando el valor es positivo indica que él Ca^{2+} y Mg^{2+} precipitarán como carbonatos (Medina et al. 2016).

El porcentaje de sodio posible (PSP) es la cantidad de sodio (Na^+) que resultaría una vez precipitados los carbonatos de calcio (CaCO_3), carbonatos de magnesio (MgCO_3) y sulfato de calcio

(CaSO₄), los cuales, al precipitarse aumentan relativamente la proporción de sodio sobre los demás cationes. Se calculó con la siguiente ecuación:

$$PSP = \left[\frac{Na^+}{Salinidad\ efectiva} \right]$$

Cuando el agua presenta valores PSP menores a 50% se considera como buena para riego (Ayers y Westcot 1987).

El Coeficiente alcalimétrico (índice de Scott) (K) valora la calidad agronómica del agua y se define como la altura del agua (en pulgadas), que después de la evaporación dejaría en el suelo; de cuatro pies de espesor (1 pie = 0.3048 m). El coeficiente K, evalúa la toxicidad que pueden producir las concentraciones de los iones cloruros, sulfatos y sodio aportadas por el agua de riego y que permanecen en el suelo tras formar cloruro y sulfato de sodio respectivamente. El cálculo de este índice se basa en los siguientes tres axiomas.

$$K1 (mg\ L^{-1}) = \frac{2040}{[Cl^-]} \quad \text{si } [Na^+] - 0.65 [Cl^-] \leq 0$$

$$K2 (mg\ L^{-1}) = \frac{6620}{[Na^+] + 2.6 [Cl^-]} \quad \text{si } 0 < ([Na^+] - 0.65 [Cl^-]) < 0.48 [SO_4^{2-}]$$

$$K3 (mg\ L^{-1}) = \frac{662}{([Na^+] - 0.32 [Cl^-] - 0.43 [SO_4^{2-}])} \quad \text{si } 0 < ([Na^+] - 0.65 [Cl^-]) > 0.48 [SO_4^{2-}]$$

Tipos de agua: cuando $K < 1.2$ el agua es mala (no utilizable); cuando $1.2 < K < 6$ el agua es peligrosa (condicionada); cuando $6 < K < 18$ el agua es tolerable y cuando $K > 18$ el agua es buena (Cánovas 1986).

El índice de saturación (IS) es una medida de la capacidad de una solución para disolver o depositar carbonato de calcio (Lodha et al. 2023). El IS se define como el pH actual del agua (pHa) menos el pH teórico (pHc) que el agua tendría al estar en equilibrio con CaCO₃. Se calcula con la siguiente expresión: *Índice de saturación* = $pHa - pHc$; $pHc = (pK_2 - pK_c) + pCa + pAlk$ (Langelier 1936). Para calcular pHc se utilizó la siguiente expresión, donde (pK₂ - pK_c) se estimó con la concentración total de cationes, pCa con la concentración de Ca²⁺ y pAlk con la concentración de CO₃²⁻ + HCO₃⁻, todo expresado en mEq L⁻¹. Valores positivos indican que el CaCO₃ precipitará en el agua, mientras que valores negativos que el agua disolverá a los CaCO₃ y que el agua es conveniente para uso agrícola (Medina et al. 2016).

Dureza del agua. El grado de dureza permite clasificar el agua de riego en función del catión calcio, se expresa en grados hidrométricos franceses (°F). Cuando el agua tiene menos de 7 °F es muy dulce, entre 7 - 14 °F es agua dulce, entre 14 - 22 °F es agua medianamente dulce, entre 22 - 32 °F es agua medianamente dura, entre 32 - 54 °F es agua dura y agua mayor de 54 °F es considerada como muy dura (Cánovas 1986). Se calcula con la siguiente expresión:

$$Dureza\ (^\circ F) = \frac{([Ca^{2+}] \times 2.5 + [Mg^{2+}] \times 4.2)}{10}$$

Toxicidad del agua. El Na⁺ y Cl⁻ en el agua de riego pueden causar toxicidad en forma individual o combinada. Para evaluar la toxicidad del agua se utilizó la siguiente clasificación: Respecto al sodio. Agua con un valor < 3 mEq L⁻¹ de Na⁺ se clasifica como toxicidad inexistente, entre 3 y 9 mEq L⁻¹ de Na⁺ como toxicidad creciente y > 9 mEq L⁻¹ de Na⁺ como toxicidad grave.

Para el caso de Cl⁻: Agua con un valor < 4 mEq L⁻¹ se clasifica como toxicidad inexistente, entre 4 y 10 mEq L⁻¹ como toxicidad creciente y > 10 mEq L⁻¹ como toxicidad grave (Ayers y Westcot 1987).

Análisis de datos

Los datos se analizaron mediante un diseño completamente al azar, con cuatro tratamientos (sitios de muestreo) y cuatro repeticiones (parcela/pozo de cada productor). Los datos se presentaron en valores medios y analizados estadísticamente con el software Infostat (Di Rienzo *et al.* 2008). Debido a que los datos cumplieron con los supuestos, se determinaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias por el método LSD (P < 0.05).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades químicas del suelo

La C.E. y el pH no presentaron diferencias estadísticas entre sitio de muestreo, con valores medios de pH superiores a 7.9. Mientras que la concentración de NO₃⁻ se encontró diferencias entre sitios, presentando los sitios GZC y GZS los mayores y menores valores, respectivamente. También, se encontraron diferencias estadísticas en la concentración de PO₄³⁻, presentando los sitios GZS y LNS13 la mayor y menor concentración, respectivamente. Mientras que las concentraciones de SO₄²⁻, Cl⁻, HCO₃⁻, CO₃²⁻, Ca²⁺, K⁺ y Na⁺ no presentaron diferencias estadísticas. Para la concentración de Mg²⁺ se observaron diferencias estadísticas (Tabla 1).

Tabla 1.- Contenido de aniones y cationes en el suelo de los municipios de Miahuatlán de Porfirio Díaz y Ejutla de Crespo, Oaxaca, México.

Muestra	C.E. dS m ⁻¹	RAS dS m ⁻¹	pH	Aniones (mEq L ⁻¹)						Cationes (mEq L ⁻¹)			
				NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
GZC	4.66a	1.54a	8.27a	26.61a	0.03ab	9.27a	5.96a	4.35a	0.38a	19.20a	19.42a	0.49a	7.57a
GZS	2.17a	1.51a	8.37a	0.42b	0.10a	8.76a	4.53a	7.55a	0.25a	7.58a	5.81ab	4.12a	4.32a
HV	0.46a	0.41a	7.90a	1.67ab	0.08ab	0.83a	0.41a	1.44a	0.27a	2.41a	1.48b	0.11a	0.59a
LNS13	2.20a	0.85a	8.08a	7.27ab	0.01b	10.24a	1.35a	2.39a	0.68a	15.94a	3.67ab	0.12a	2.56a

GZC: Guixé, Zona Centro, GZS: Guixé, Zona Sur, HV: Hacienda Vieja, LNS13: La Noria Sección 13. Comparación de medias por el método LSD (p < 0.05), letras diferentes indican diferencia estadística significativa.

En todos los sitios de muestreo, el pH fue superior a 7.90, lo cual indica que estos suelos no tienen problemas de Al, elemento que reduce el crecimiento y rendimiento de los cultivos en suelos ácidos (Muhammad *et al.* 2019). En los sitios LNS13 y GZC la concentración de NO₃⁻ fue de 7.27 y 26.61 mEq L⁻¹, respectivamente, valores superiores a lo recomendado para soluciones

nutritivas para cultivos en suelo (Favela-Chávez *et al.* 2006). En los sitios de muestreo GZC, GZS y LNS13 el anión sulfato se encuentra en concentración superior a 7 mEq L⁻¹, que es mayor a la concentración recomendada por Steiner (1984). El azufre participa en la biosíntesis de proteínas y clorofila, por lo que los síntomas de deficiencia de este elemento son similares a los del nitrógeno; por el contrario, la fitotoxicidad por azufre es muy raro, por lo que hay pocos informes debido a los amplios márgenes de tolerancia que tienen los cultivos a este elemento (Shankar *et al.* 2020).

Los sitios GZS y GZC presentaron la mayor concentración de Cl⁻ con 4.53 y 5.96 mEq L⁻¹, respectivamente. Las deficiencias de Cl⁻ no son comunes en campo, debido a la baja demanda de este elemento en la mayoría de los cultivos; por el contrario, el exceso de Cl⁻, puede generar daños fisiológicos severos, los cuales, afectan la calidad y rendimiento del cultivo, inclusive, altas concentraciones de Cl⁻ puede causar fitotoxicidad (Favela-Chávez *et al.* 2006). Los HCO₃⁻ y CO₃²⁻ se deben manejar en concentraciones inferiores a 1 mEq L⁻¹ para que los nutrientes estén disponibles para las plantas. Los suelos calizos con altas concentraciones de HCO₃⁻ y CO₃²⁻ limitan el rendimiento de los cultivos, especialmente en cultivos con deficiencias de hierro (Poschenrieder *et al.* 2018). Las altas concentraciones de calcio en el suelo, puede significar ahorro en fertilizantes, como en el caso del sitio GZC que registró un valor promedio de 19.20 mEq L⁻¹. El Ca²⁺ es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas (Karthika 2018); además que es un compuesto de señalización, que regula el metabolismo celular y la producción de energía dentro de las mitocondrias y los cloroplastos (Metwally 2018).

Se encontraron altas concentraciones de Mg²⁺, con valores promedio de 1.48 mEq L⁻¹ en el sitio HV, hasta 19.42 mEq L⁻¹ en el sitio GZC. El Mg²⁺ es esencial para los cultivos, su deficiencia afecta la fotosíntesis y la distribución de los carbohidratos (Farhat *et al.* 2016); además de que puede encontrarse en las plantas como elemento estructural, formando parte de la molécula de clorofila o como cofactor enzimático (Partida *et al.* 2022). La deficiencia de Mg²⁺ es un problema en suelos ácidos que están saturados con cationes, como H⁺, Al³⁺ y Mn²⁺ y que sufren lixiviación intensiva, particularmente en áreas con altas precipitaciones (Chen *et al.* 2018).

El sitio GZS tuvo el mayor contenido de K⁺, lo cual puede significar menor aplicación de este elemento; pero hay que revisar que la alta concentración de K⁺ no genere desbalance entre cationes. El exceso de potasio puede causar deficiencias de Ca²⁺ o Mg²⁺ (Novoa *et al.* 2018). Se registraron concentraciones promedio de hasta 7.57 mEq L⁻¹ de Na, elemento que puede ser antagonista de los demás cationes, interfiriendo en la absorción de nutrientes e impidiendo la captación de los mismos, hasta alcanzar niveles citosólicos tóxicos para el metabolismo celular (Medina 2016).

Propiedades químicas del agua

La C.E. del agua presentó diferencias estadísticas, presentando el sitio GZS el mayor valor (1.19 mEq L⁻¹). Mientras que las variables pH y Ca²⁺ no presentaron diferencias estadísticas. La concentración de Mg²⁺ tuvo diferencias estadísticas, presentando los sitios HV y LNS13 la menor concentración con 2.60 y 2.68 mEq L⁻¹, respectivamente, lo cual significa un aporte importante de Mg²⁺. La concentración de Na⁺ presentó diferencia estadística, presentando el sitio GZS la mayor concentración (2.60 mEq L⁻¹). La concentración de K⁺ tuvo diferencias estadísticas entre sitios, presentando los sitios GZS y GZC la mayor concentración; pero estas concentraciones se consideran bajas, ya que son inferiores a 1 mEq L⁻¹. La concentración de SO₄²⁻ también tuvo

diferencias estadísticas, presentando el sitio de muestreo GZS la mayor concentración (2.42 mEq L⁻¹). Todos los sitios de muestreo presentaron concentración de HCO₃⁻ en el agua, con diferencias estadísticas presentando los sitios GZS, LNS13 y GZC la mayor concentración. Debido a las altas concentraciones de HCO₃⁻ (superiores a 1 mEq L⁻¹) en el agua, estas deben ser neutralizadas. Para el Cl⁻ y CO₃²⁻ no se encontraron diferencias estadísticas. Mientras que el NO₃⁻ en el agua presentó diferencias estadísticas, con valores inferiores a 1 mEq L⁻¹ (Tabla 2).

Tabla 2.- Contenido de aniones y cationes en el agua de los municipios de Miahuatlán de Porfirio Díaz y Ejutla de Crespo, Oaxaca, México.

Muestra	C.E. dS m ⁻¹	pH	Cationes (mEq L ⁻¹)				Aniones (mEq L ⁻¹)				
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	NO ₃ ⁻
GZC	0.83b	7.80a	3.47a	3.48ab	1.14b	0.18a	0.86b	7.12a	0.21a	0.25a	0.0466b
GZS	1.19a	7.67a	4.79a	4.32a	2.60a	0.20a	2.42a	7.97a	1.00a	0.00a	0.77a
HV	0.68b	7.59a	3.51a	2.60b	0.70b	0.09b	1.06ab	4.94b	0.44a	0.00a	0.33ab
LNS13	0.87ab	7.45a	4.74a	2.68b	1.32b	0.05b	0.99b	7.31a	0.30a	0.00a	0.29ab

GZC: Guixé, Zona Centro, GZS: Guixé, Zona Sur, HV: Hacienda Vieja, LNS13: La Noria Sección 13. Comparación de medias por el método LSD (p < 0.05), letras diferentes indican diferencia estadística significativa.

Para la C.E. los valores encontrados fueron menores o cercanos a 1 dS/m, lo cual, no compromete el rendimiento máximo de los cultivos (Preciado-Rangel *et al.* 2021). El pH superó a 7.45, lo cual es mayor a los valores de 5.5 a 6.5 recomendados para la buena absorción de nutrientes y desarrollo de los cultivos (Ayres *et al.* 2022). La concentración de Ca²⁺ en el agua fue superior a 3.47 mEq L⁻¹, lo que significa un importante aporte de calcio, al respecto Steiner (1984) considera una concentración de 9 mEq L⁻¹ para una solución nutritiva balanceada. La deficiencia de calcio puede originarse por baja transpiración, humedad no adecuada y pobre crecimiento de raíces (Maldonado-Torres *et al.* 2020). Los valores promedio de Mg²⁺ fueron superiores a 2.6 mEq L⁻¹, los cuales son inferiores a la concentración de 4 mEq L⁻¹ indicada por Steiner (1984), lo cual significa que el uso de fertilizantes para cubrir la demanda de este elemento es mínimo. El magnesio es uno de los componentes de la clorofila, participa en la fotosíntesis, y es esencial en el metabolismo energético de las plantas y en la formación de proteínas (Bagale 2021). Aunque la disponibilidad de magnesio se ve afectada por cationes como el calcio, manganeso, amonio y potasio (Kwano 2017).

La salinidad se debe principalmente a cationes como sodio Na⁺, calcio (Ca²⁺), magnesio (Mg²⁺), potasio (K⁺), y aniones como cloruro (Cl⁻), sulfato (SO₄²⁻), nitrato (NO₃⁻) y bicarbonato (HCO₃⁻) (Artiola *et al.* 2019). Al respecto, se sabe que la salinidad restringe el rendimiento y crecimiento de los cultivos (Zhao *et al.* 2020). El K⁺ se requiere en altas concentraciones debido a su importancia en funciones fisiológicas, activador en diversos procesos, necesarios para la conservación del agua en la planta, así como para la apertura y cierre estomático; también promueve la acumulación y translocación de los carbohidratos (Gaona-Gonzaga *et al.* 2020). Pero el exceso limita el desarrollo vegetativo (Lizarazo *et al.* 2013).

No se encontraron altas concentración de SO₄²⁻, por lo cual, este elemento debe ser agregado al preparar una solución nutritiva. También, es importante tomar en cuenta las

concentraciones de CO_3^{2-} y HCO_3^- , que en concentraciones mayores a 1.5 mEq L^{-1} afectan la absorción de nutrientes en la solución nutritiva (Ortiz *et al.* 2017). En la práctica se recomienda el uso de ácidos para reducir la concentración de CO_3^{2-} y HCO_3^- . 1 mEq L^{-1} de HCO_3^- se neutraliza con 1 mEq L^{-1} de ácido y 1 mEq L^{-1} de CO_3^{2-} se neutraliza con 2 mEq L^{-1} de ácido. El contenido promedio de CO_3^{2-} en las muestras de agua estudiadas es bajo $\leq 0.25 \text{ mEq L}^{-1}$. Por lo que se recomienda dejar 0.5 mEq L^{-1} de HCO_3^- sin neutralizar. Debido a que el contenido de NO_3^- en el agua es muy bajo, se debe agregar este elemento para cubrir la demanda del cultivo.

Calidad de agua

Las variables C.E., SE, RAS, PSP, K e IS presentaron diferencias estadísticas, mientras que las variables pH, SP, CSR y dureza del agua no presentaron diferencias estadísticas. En Ejutla de Crespo, el agua usada para riego de hortalizas es medianamente alcalina, ya que tiene pH entre 7.4 y 8.5. Por lo que, se requiere disminuir el pH de agua, hasta en tres unidades. Según la C.E., el agua del sitio HV es de salinidad media ($0.25\text{-}0.75 \text{ mS cm}^{-1}$) y la de los sitios GZC, GZS y LNS13 es de salinidad alta ($0.75\text{-}2.25 \text{ mS cm}^{-1}$). Según la SE el agua de los sitios de muestreo GZC, HV y LNS13 es apta para riego (Valores $< 3 \text{ mEq L}^{-1}$) y el agua del sitio GZS es apta con precauciones ($3 \text{ a } 15 \text{ mEq L}^{-1}$). De acuerdo con la SP el agua de tres sitios (GZC, HV y LNS13) es de buena calidad (valores $< 3 \text{ mEq L}^{-1}$) y el sitio GZS tiene agua condicionada (de $3 \text{ a } 15 \text{ mEq L}^{-1}$). De acuerdo con la RAS, el agua de todos los sitios es baja en sodio ($0\text{-}10 \text{ dS m}^{-1}$). Mientras que la CSR clasifica el agua de todos los sitios como de buena calidad (valores $< 1.25 \text{ mEq L}^{-1}$), por lo que no se presentarán problemas por precipitación de calcio y magnesio en forma de carbonatos. Pero por los valores de la PSP, que son mayores a 50%, el agua no es buena para riego por la cantidad de sodio (Na^+) que podría precipitar los carbonatos de calcio, carbonatos de magnesio y sulfato de calcio.

La variable K clasifica el agua de los sitios GZC, GZS y LNS13 como agua tolerable ($6 \text{ a } 18 \text{ mg L}^{-1}$) y la del sitio HV como buena para la producción agrícola ($K > 18 \text{ mg L}^{-1}$). Según los valores IS el agua disuelve los CaCO_3 y no los precipita. De acuerdo con la dureza, el agua de tres sitios (GZC, GZS y LNS13) es agua dura ($32 \text{ a } 54 \text{ °F}$) y el agua de un sitio es medianamente dura ($22 - 32 \text{ °F}$). El agua de todos los sitios tuvo toxicidad inexistente, ya que las concentraciones de Na^+ y Cl^- son menores a $3 \text{ y } 4 \text{ mEq L}^{-1}$ (Tabla 3).

Tabla 3.- Variables de la calidad del agua de los municipios de Miahuatlán de Porfirio Díaz y Ejutla de Crespo, Oaxaca, México.

Muestra	SE mEq L^{-1}	SP mEq L^{-1}	RAS dS m^{-1}	CSR mEq L^{-1}	PSP %	K mg L^{-1}	IS mEq L^{-1}	Dureza °F
GZC	1.32b	1.07a	0.61b	0.43a	86.37c	9.81b	-11.14ab	35.73a
GZS	4.51a	3.42a	1.22a	-1.15a	91.90b	8.90b	-16.81b	44.12a
HV	1.97b	1.50a	0.40b	-1.17a	88.02bc	37.49a	-7.67a	30.40a
LNS13	1.53b	1.30a	0.69b	-0.11a	96.37a	8.33b	-13.33ab	36.93a

GZC: Guixé, Zona Centro, GZS: Guixé, Zona Sur, HV: Hacienda Vieja, LNS13: La Noria Sección 13. Comparación de medias por el método LSD ($p < 0.05$), letras diferentes indican diferencia estadística significativa.

En el sitio GZS se encontraron los mayores valores de SE y RAS. Mientras que, para la PSP, el sitio LNS13 presentó los mayores valores y el sitio de GZC el menor valor. Para las variables K e IS el sitio HV presentó los mayores valores. Mientras que las variables SP, CSR y Dureza no

presentaron diferencias estadísticas. De acuerdo con los valores de SE el agua del sitio GZS, dejará más sales en la solución del suelo. Por lo que el agua de este sitio se clasifica como apta con precauciones; pero los valores presentados son bajos comparado con los valores de 51.5 mEq L^{-1} reportados en el Valle Yaqui de Sonora (Cortés-Jiménez *et al.* 2008). En los sitios GZC, HV y LNS13 se encontraron valores de SP inferiores a 3 mEq L^{-1} lo que indica que el agua es adecuada para uso agrícola, ya que no tiene problemas por cloruros y sulfatos. Estos datos coinciden con Betancourt *et al.* (2019) quienes encontraron valores de SP inferiores a 3 mEq L^{-1} en el 100% de las muestras analizadas. Por el contrario, Herrera *et al.* (2018) encontraron valores de SP inferiores a 3 mEq L^{-1} solo en el 23% de las muestras estudiadas.

De acuerdo con la RAS, las aguas tienen bajo contenido de sodio, lo que indica baja peligrosidad sódica, y adecuadas para uso agrícola. Cuando la RAS es alto por las concentraciones de sodio, el suelo pierde la capacidad de conducir agua y oxígeno, generando un ambiente anaerobio, acumulando sales que no son nutrientes para las plantas (Rodríguez *et al.* 2022). Según la clasificación de CSR las aguas son de buena calidad para uso agrícola. Debido a que los valores de CSR son inferiores a 1.25 mEq L^{-1} no se generan problemas que indiquen peligrosidad del sodio producto de la reacción de los cationes calcio y magnesio con los aniones carbonato (Cano y Atajo 2019).

Debido a que las aguas presentaron valores de PSP mayores a 50%, no se consideran buenas para riego. En caso de utilizar para riego aguas con PSP mayores a 50%, es recomendable mezclarlas con mejoradores (yeso), con aguas dulces, y no aplicarlas en suelos arcillosos, de lo contrario podrán volver sódico al suelo (Jeen *et al.* 2021). Según la variable K las aguas estudiadas se encuentran en la categoría de tolerables y buenas para el riego, lo cual, no ocasiona problemas de acumulación de sales en forma de cloruro y sulfato de sodio. Cuando el agua se clasifica como peligrosa, se deben seleccionar los suelos a regar, evitando los de textura arcillosa, y realizar prácticas de desagüe artificial (Mogollón *et al.* 2021). La IS en todas las muestras fue negativo, lo que indica que no ocasionarán problemas por precipitación de CaCO_3 , ya que valores negativos indican que el agua disolverá los CaCO_3 . El IS está relacionado con la deposición de una película o incrustación de carbonato de calcio, que puede dañar los componentes de un sistema de riego (Lodha *et al.* 2023).

La dureza del agua se toma en cuenta al preparar una solución nutritiva. Según la dureza, estas se clasifican en la categoría de aguas medianamente dura, agua dura y agua muy dura, lo cual, indica que presentan una concentración considerable de iones de calcio y magnesio. Lo que puede provocar obstrucciones en el sistema de riego además de deterioro de la calidad del suelo (Rivas y Aubrum 2015). La concentración real de Na^+ y Cl^- en el agua para causar fitotoxicidad depende del cultivo en cuestión (Zaman *et al.* 2018). Sin embargo, según la clasificación propuesta por Ayers y Westcot (1987) la concentración de Na^+ y Cl^- encontrada no causará fitotoxicidad, debido a que se encuentran en concentraciones menores a 3 y 4 mEq L^{-1} , respectivamente.

El suelo presentó un pH mayor a 7.9, el cual es superior al requerido para la absorción de nutrientes por las raíces de la mayoría de las plantas; así como altas concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} , lo que implica menor uso de fertilizantes. El sitio GZC presentó la mayor concentración de NO_3^- , Ca^{2+} y Mg^{2+} en suelo, pH superior a 7 con alto contenido de HCO_3^- , por lo que se sugiere el uso de ácidos (nitrítico, fosfórico y/o sulfúrico) a una relación 1:1 (equivalente: equivalente) para neutralizar los HCO_3^- . También, el agua contiene alta concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} , lo que implica

ahorro de estos elementos, ya que el productor puede considerarlos al formular las soluciones nutritivas. El sitio de muestreo GZS presentó la mayor concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na, K^+ y SO_4^{2-} en agua. El agua tiene características que la clasifican como buena para el riego agrícola, con pequeñas correcciones que deben ser atendidas.

AGRADECIMIENTOS

A los productores integrantes del PRODETER Ejutla de Crespo, Oaxaca, México y a los productores cooperantes que contribuyeron, facilitaron y permitieron el muestreo de sus parcelas.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

Ninguna.

LITERATURA CITADA

- Artiola J, Walworth J, Musil S, Crimmins M (2019) Soil and land pollution. In: Brusseau ML, Pepper IL, Gerba ChP (eds) Environmental and Pollution Science. Third Edition. Academic Press. United States. pp. 219-235. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814719-1.00014-8>.
- Ayers RS, Westcot DW (1987) La calidad del agua y su uso en la agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje 29 Rev. 1. Food and Agriculture Organization. Roma, Italia. 81p.
- Ayres JI, Grasso R, Berrueta C (2022) Control de la solución nutritiva hidropónica (NFT) basado en el pH y la conductividad: luces y sombras. Hortifruticultura. 71: 108-112.
- Bagale S (2021) Nutrient management for soybean crops. International Journal of Agronomy 2: 1-10. <https://doi.org/10.1155/2021/3304634>.
- Betancourt AC, Tartabull T, Labaut Y, Ferradaz R (2019) Principales procesos que impactan la calidad del agua para el riego en pozos costeros del centro sur cubano. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 35(3): 541-552. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.03.02>.
- Cano OJ, Atajo CJ (2019) Calidad del agua de la irrigación canal n del río Llallimayo y aptitud agrícola distrito Cupi - Melgar 2018. Revista de Investigaciones 8(2): 1069-1081. <https://doi.org/10.26788/riepg.v8i2.1374>.
- Cánovas CJ (1986) Calidad agronómica de las aguas de riego. 4ta. Edición. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Servicio de Extensión Agraria. Madrid, España. 139p.
- Chen ZC, Peng WT, Li J, Liao H (2018) Functional dissection and transport mechanism of magnesium in plants. Seminars in Cell & Developmental Biology. 74: 142-152. <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2017.08.005>.
- Cortés-Jiménez JM, Troyo-Diéguez E, Murillo-Amador B, García-Hernández JL, Garatuza-Payán J, Suh LS (2008) Índices de calidad del agua del acuífero del Valle del Yaqui, Sonora. Terra Latinoamericana 27(2): 133-141.
- Cruz-Andrés OR, Pérez-Herrera A, Martínez-Gutiérrez GA, Morales I (2018) Cubiertas de macrotúneles y su efecto en las propiedades nutraceuticas del chile de agua. Revista Fitotecnia Mexicana 41(4A): 555-558.
- Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, González L, Tablada M, Robledo CW (2008) InfoStat versión 2008. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.

- Doneen LD (1958) Studies of water quality criteria. Quality of water for irrigation. Proc. Conf. on Quality of Water for Irrigation. Water Resources Center. Davis, Calif., U.S.A. 14: 46–56.
- Farhat N, Elkhouni A, Zorrig W, Smaoui A, Abdelly C and Rabhi M (2016) Effects of magnesium deficiency on photosynthesis and carbohydrate partitioning. *Acta Physiologiae Plantarum* 38(6): 145. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2165-z>.
- Favela-Chávez E, Preciado-Rangel P, Benavides-Mendoza A (2006) Manual para la Preparación de Soluciones Nutritivas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, México. 146p.
- Gaona-Gonzaga P, Vásquez-Rojas L, Aguayo-Pacas S, Viera-Arroyo W, Viteri-Díaz P, Sotomayor-Correa A, Medina-Rivera L, Mejía-Bonilla P, Cartagena-Ayala Y (2020) Respuesta del cultivo de granadilla (*Passiflora ligularis* Juss) cultivar “Colombiana” al suministro de nitrógeno y potasio por fertirriego. *Manglar* 17(1): 75-82.
- Grahmann K, Verhulst N, Buerkert A, Ortiz-Monasterio I, Govaerts B (2013) Nitrogen use efficiency and optimization of nitrogen fertilization in conservation agriculture. *CAB Reviews* 8 (053): 1-19. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20138053>.
- Herrera AV, Gutiérrez RN, Córdova MS, Luque MJ, Idelfonso CM, Flores RA, Romero AL (2018) Calidad del agua subterránea para el riego en el Oasis de Pica, norte de Chile. *Idesia (Arica)* 36(2): 181-191. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292018005000101>.
- INEGI (2016) Anuario estadístico y geográfico de Oaxaca 2016. Continuo Nacional del Conjunto de Datos Vectorial Edafológico Escala 1: 250 000, serie II. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 27p.
- INEGI-CONAFOR (2013) Inventario Estatal Forestal y de Suelos - Oaxaca 2013. Instituto Nacional de Estadística y Geografía - Comisión Nacional Forestal. 180p.
- Jeen SW, Kang J, Jung H, Lee J (2021) Review of Seawater Intrusion in Western Coastal Regions of South Korea. *Water* 13(6): 1-27. <https://doi.org/10.3390/w13060761>.
- Karthika KS, Rashmi I, Parvathi MS (2018) Biological functions, uptake and transport of essential nutrients in relation to plant growth. In: Hasanuzzaman M, Fujita M, Oku H, Nahar K, Hawrylak-Nowak B (eds) *Plant nutrients and abiotic stress tolerance*. Springer. Singapore. pp. 1-49. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_1.
- Kwano BH, Moreira A, Moraes LAC, Nogueira MA (2017) Interacción magnesio-manganeso en cultivares de soja con diferentes necesidades nutricionales. *Journal of Plant Nutrition* 40(3): 372-381. <https://doi.org/10.1155/2021/3304634>.
- Langelier WF (1936) The analytical control of anti-corrosion water treatment. *Journal AWW* 28: 1500-1521.
- Lesch SM, Suarez DL (2009) Technical note: A short note on calculating the adjusted sar index. *Transactions of the ASABE* 52(2): 493-496.
- Lizarazo MÁ, Hernández CA, Fischer G, Gómez MI (2013) Response of the banana passion fruit (*Passiflora tripartita* var. *mollissima*) to different levels of nitrogen, potassium and magnesium. *Agronomía Colombiana* 31(2): 184-194.
- Lizcano TR, Olivera VD, Machado L, Saavedra MD, Machado CL, Rolando VE, Moreno PMF, Fidel FM (2017) Muestreo de suelos, técnicas de laboratorio e interpretación de análisis de suelos. Ed. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro de Formación Agroindustrial La Angostura. Ecuador. 79p.
- Lodha R, Sharma Y, Prakash SO, Trivedi A, Chaplot H, Chaudhary M, Choudhary S (2023) Scaling Potential and Corrosion Assessment through Langelier Saturation Index and Ryznar Stability Index of Under Ground Water in Udaipur, Rajasthan. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology* 10(7): 254-260. <https://doi.org/10.17148/IARJSET.2023.10735>.
- Maldonado-Torres R, Álvarez-Sánchez MaE, Abarca-Cervantes AD, Almaguer VG (2020) Cambios celulares en hojas de aguacate con deficiencias de calcio. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 11(1): 13-23. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i1.2209>.
- Medina GLR (2016) La agricultura, la salinidad y los hongos micorrízicos arbusculares: una necesidad, un problema y una alternativa. *Cultivos Tropicales* 37(3): 42-49. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1117.9765>.
- Medina VEK, Mancilla VOR, Michel LM, Guevara GRD, Olguín LJJ, Barreto GOA (2016) Calidad del agua para riego y suelos agrícolas en Tuxcacuesco, Jalisco. *IDESIA: Revista de Agricultura en Zonas Áridas* 34(6): 51-59. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292016005000035>.
- Metwally AM, Radi AA, El-Shazoly RM, Hamada AM (2018) The role of calcium, silicon and salicylic acid treatment in protection of canola plants against boron toxicity stress. *Journal of Plant Research* 131: 1015-1028. <https://doi.org/10.1007/s10265-018-1008-y>.

- Mogollón JP, Fernández CT, Garrido H, Cordero A, Quintero DA, Castillo Y, Colmenares Y (2021) Determination of Groundwater Quality for Irrigation Use in Agricultural Systems. *Ciencia en Revolución* 7(21): 59-72 <https://doi.org/10.5281/zenodo.5721969>.
- Muhammad N, Zvobgo G, Guo-ping Z (2019) A review: The beneficial effects and possible mechanisms of aluminum on plant growth in acidic soil. *Journal of Integrative Agriculture* 18(7): 1518-1528. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)61991-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61991-4).
- Novoa MA, Diranda D, Melgarejo LM (2018) Efecto de las deficiencias y excesos de fósforo, potasio y boro en la fisiología y el crecimiento de plantas de aguacate (*Persea americana*, cv. Hass). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 12(2): 293-307. <https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i2.8092>.
- Ortiz EV, Niz AE, Savio ME, Lamas CA, Barbieri NR, Duchowicz PR (2017) Análisis geoquímico de la calidad de agua en el Valle de Chaschuil-Catamarca. *Revista de Tecnología y Ciencias Aplicadas* 2(1): 17-22.
- Partida L, Díaz T, Cortegaza L, Zazueta ND, Cazarez FLL (2022) Compilación sobre nutrimentos, sustancias donde se les encuentra y síntomas que ocasionan cuando su concentración disminuye en las plantas. *UCE Ciencia. Revista de Postgrado* 10(3): 1-11.
- Preciado-Rangel P, Rueda-Puente EO, Valdez-Aguilar LA, Reyes-Pérez JJ, Gallegos-Robles MÁ, Murillo-Amador B (2021) Conductividad eléctrica de la solución nutritiva y su efecto en compuestos bioactivos y rendimiento de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.). *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 24(52): 1-12. <https://doi.org/10.56369/tsaes.3375>.
- Poschenrieder C, Fernández J, Rubio L, Pérez L, Terés J, Barceló J (2018) Transport and Use of Bicarbonate in Plants: Current knowledge and challenges ahead. *International Journal of Molecular Sciences* 19(5): 1-25. <https://doi.org/10.3390/ijms19051352>.
- Ramírez VLM, Vargas RAF, Arroyave CAF (2022) Relación entre el pH y las mediciones de conductividad eléctrica en un suelo cultivable ubicado en Medellín, Colombia. *Ingenierías USBMed* 13(2): 56-62. <https://doi.org/10.21500/20275846.4706>.
- Rice EW, Baird RB, Eaton AD (2012) Standard methods for the examination of water and wastewater. Edited and Revised 22nd. American Public Health Association. 724p.
- Richards LA (1990) Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. 6ª reimpresión. Manual de Agricultura N° 60. Laboratorio de Salinidad. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de America. Limusa. México. 172p.
- Rivas P, Aubrum J (2015) Importancia del análisis de agua. *Boletín Hortícola* 19(53): 27-29.
- Rodríguez S, Jaramillo S, Zurita D, Valdiviezo A, Choloquinga C (2022) Evaluación de la calidad del agua de riego proveniente de la acequia Tilipulo Enríquez-Cotopaxi mediante la relación de Absorción de Sodio (RAS). *Revista Politécnica* 49(2): 55-64. <https://doi.org/10.33333/rp.vol49n2.06>.
- SADER (2019) ACUERDO por el que se dan a conocer los Lineamientos de Operación del Programa de Desarrollo Rural de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural para el ejercicio fiscal 2019. *Diario Oficial de la Federación*. 32p.
- SINEC (2001a) Norma Mexicana, NMX-AA-073-SCFI-2001, Análisis de agua - determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Sistema Integral de Normas y Evaluación de la Conformidad. *Diario Oficial de la Federación*. 13p. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166789/NMX-AA-073-SCFI-2001.pdf>. Fecha de consulta: 3 de octubre de 2023.
- SINEC (2001b) Norma Mexicana, NMX-AA-079-SCFI-2001, Análisis de aguas - determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Sistema Integral de Normas y Evaluación de la Conformidad. *Diario Oficial de la Federación*. 22p. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166794/NMX-AA-079-SCFI-2001.pdf>. Fecha de consulta: 3 de octubre de 2023.
- SINEC (2001c) Norma Mexicana, NMX-AA-072-SCFI-2001, Análisis de agua-determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba. Sistema Integral de Normas y Evaluación de la Conformidad. *Diario Oficial de la Federación*. 14p. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166788/NMX-AA-072-SCFI-2001.pdf>. Fecha de consulta: 3 de octubre de 2023.

- SINEC (2016) Norma Mexicana, NMX-AA-008-SCFI-2016, Análisis de agua- medición de pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba. Sistema Integral de Normas y Evaluación de la Conformidad. Diario Oficial de la Federación. 16p. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166767/NMX-AA-008-SCFI-2016.pdf>. Fecha de consulta: 3 de octubre de 2023.
- SINEC (2018) Norma Mexicana, NMX-AA-093-SCFI-2018, Análisis de agua-medición de la conductividad eléctrica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba. Sistema Integral de Normas y Evaluación de la Conformidad. Diario Oficial de la Federación. 17p. http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/AA093-2018_06.pdf. Fecha de consulta: 3 de octubre de 2023.
- SEMARNAT (2002) NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. 72p. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>. Fecha de consulta 3 de octubre de 2023.
- Shankar S, Jaiswal L, Rhim JW (2020) New insight into sulfur nanoparticles: Synthesis and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 1: 1-28. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1780880>.
- SIAP (2020) Anuario estadístico de la producción agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Fecha de consulta: 10 de octubre de 2023.
- SMN (2020) Normales climatológicas del Estado de: Oaxaca del periodo: (1991 - 2020). Servicio Meteorológico Nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=oax>. Fecha de consulta: 3 de noviembre de 2023.
- Steiner AA (1968) Soilless culture In: *Proceedings of the 6th Colloquium of the International Potash Institute*. Publisher: International Potash Institute, Bern, Switzerland. Florence, Italy. Pp. 324-341.
- Steiner AA (1984) The universal nutrient solution. In: *Proceedings of sixth international congress on soilless culture*. International Society for Soilless Culture. Lunteren Wageningen, The Netherlands. pp. 633-650.
- Stewart WM (2007) Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes *Informaciones Agronómicas*. International Plant Nutrition Institute 67: 1-7.
- Suárez DL (1981) Relation between pH and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternative method of estimating SAR of soil or drainage waters. *Soil Science Society of America Journal* 45: 464-475.
- USSL (1954) *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. United States Salinity Laboratory. Handbook No. 60. Washington, D.C: USDA. 159p.
- Zaman M, Shahid S, Heng L (2018) *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*. 1er Edition. Springer Cham. 164p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3>.
- Zhao C, Zhang H, Song C, Zhu J, Shabala S (2020) Mechanisms of plant responses and adaptation to soil salinity. *The Innovation* 1(1): 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2020.100017>.