



Análisis multivariado de suelos irrigados con aguas residuales de la acuicultura¹

Multivariate analysis of soils irrigated with aquaculture wastewater

*Aldo Iram Leal-Mendoza*², *Elizabeth García-Gallegos*³, *Oscar G. Vázquez-Cuecuecha*³,
*Elizabeth Hernández-Acosta*⁴

- ¹ Recepción: 10 de febrero, 2022. Aceptación: 4 de julio, 2022. El trabajo formó parte del proyecto “Reutilización de las aguas residuales de la acuicultura en la irrigación de plantas y su efecto en el suelo”, con el apoyo del Comité Estatal de Sanidad Acuicola de Tlaxcala (CESATLAX, A.C.) y llevado a cabo en la Universidad Autónoma de Tlaxcala, Tlaxcala, México.
- ² Universidad Autónoma de Tlaxcala, Licenciatura en Medicina Veterinaria y Zootecnia, Tlaxcala, México. CP. 90500. aldoiram.lealmendoza@uatx.mx (<http://orcid.org/0000-0001-7620-6484>).
- ³ Universidad Autónoma de Tlaxcala, Centro de Investigación en Genética y Ambiente. Ixtacuixtla, Tlaxcala, México. CP. 90000. egarciag@uatx.mx (autor para correspondencia; <http://orcid.org/0000-0001-6430-2866>); oscarvc1@hotmail.com (<http://orcid.org/0000-0001-7482-5521>).
- ⁴ Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos, Carretera Federal México-Texcoco, Texcoco, Estado de México, México. ehernandez@chapingo.mx (<http://orcid.org/0000-0002-1409-1623>).

Resumen

Introducción. Las aguas residuales de la acuicultura constituyen un recurso que se puede utilizar para la irrigación de suelos agrícolas. **Objetivo.** Evaluar las propiedades físicas, químicas y biológicas de suelos con irrigación continua de aguas residuales de la acuicultura e identificar las variables que aporten mayor información con relación a su comportamiento por la irrigación. **Materiales y métodos.** Los tratamientos fueron tres suelos agrícolas, localizados al sur del estado de Tlaxcala, México, en el año 2018 se realizó el muestreo de suelo a una profundidad de 0-30 cm y nueve repeticiones para determinar: pH, materia orgánica, conductividad eléctrica, nitrato, amonio, N total, fósforo, potasio, calcio, magnesio, textura, densidad aparente y la actividad microbiana, con las cuales se aplicó un análisis de componentes principales (ACP). **Resultados.** La irrigación con aguas residuales de la acuicultura incrementó la concentración de fósforo, potasio, calcio, amonio y nitratos. A través del análisis de correlación lineal y el ACP, se obtuvo que el primer componente principal explicó el 76 % de la varianza total, asociado al pH, materia orgánica, arena, N total, potasio, magnesio y amonio; mientras que, el segundo componente explicó el 23 % de la varianza total, ligado al fósforo y a la adsorción por el complejo de cambio que aporta la arcilla. **Conclusión.** La irrigación con aguas residuales de la acuicultura mejoró la fertilidad del suelo y con el análisis de componentes principales (ACP) se identificaron como variables indicadoras al fósforo, la partícula arcilla y el magnesio, para la toma de decisiones sobre el manejo de los suelos irrigados con aguas residuales de la acuicultura.

Palabras clave: agricultura, calidad del suelo, análisis de componentes principales, calidad del agua.



Abstract

Introduction. Aquaculture wastewater is an important resource that can be used for irrigation of agricultural land. **Objective.** To evaluate the physical, chemical, and biological properties of soils with continuous irrigation of aquaculture wastewater and to identify the variables that provide more information in regarding their behavior under irrigation. **Materials and methods.** The treatments were three agricultural soils, located in the south of the state of Tlaxcala, Mexico, in 2018 soil sampling was performed at a depth of 0-30 cm and nine replicates to determine: pH, organic matter, electrical conductivity, nitrate, ammonium, total N, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, texture, apparent density, and microbial activity, with which a principal component analysis (PCA) was applied. **Results.** Irrigation with aquaculture wastewater increased the concentration of phosphorus, potassium, calcium, ammonium, and nitrates. Through linear correlation analysis and PCA, it was obtained that the first principal component explained 76 % of the total variance, associated with pH, organic matter, sand, total N, potassium, magnesium, and ammonium, while the second component explained 23 % of the total variance, linked to phosphorus and adsorption by the exchange complex provided by the clay. **Conclusion.** Irrigation with aquaculture wastewater improved soil fertility and with the principal component analysis (PCA) phosphorus, clay particle, and magnesium were identified as indicator variables that will support the management of soils irrigated with aquaculture wastewater.

Keywords: farming, soil quality, principal component analysis, water quality.

Introducción

Un incremento en la competencia por el agua hace que sea un recurso cada vez más escaso para riego o cualquier otro propósito agrícola, por lo que es necesario la búsqueda de fuentes alternas, tal como el reúso de las aguas residuales, las cuales aumentan el ingreso de materia orgánica y nutrimentos a los suelos agrícolas, lo que contribuye a mejorar su fertilidad; pero también pueden traer consigo altos contenidos de sales, microorganismos patógenos y metales pesados que deterioran la calidad del suelo (González-Fragozo et al., 2020; Omotade et al., 2019). El impacto del uso de agua residual, no solo debe evaluarse desde una perspectiva social, económica y ambiental, sino también desde el punto de vista de la mejora sostenible del suelo (Odoemena et al., 2020).

La acuicultura es una fuente importante de alimento, nutrición, ingreso y medio de vida para miles de personas en todo el mundo, es uno de los sectores productivos de mayor crecimiento (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación, 2016; Valenti et al., 2018). No obstante, actividades como la acuicultura requieren un gran volumen de agua, lo que trae como consecuencia una descarga considerable de aguas residuales con altas concentraciones de nutrimentos (Turcios & Papenbronk, 2014) y materia orgánica que en su mayoría son excretados por los peces en fracciones sólidas y disueltas, acumulándose en aquellos sistemas de producción cerrados donde el recambio de agua es bajo (Endut et al., 2010).

El reúso de las aguas residuales de la acuicultura, ha sido una opción viable para incrementar la producción de *Spinacia oleracea* L. (Zhang et al., 2014), *Licopersicum sculentum* L. (Villalobos-Reyes & González-Pérez, 2016), *Cucumis sativus* L. (Mangmang et al., 2016), *Lactuca sativa* L. (Alcarraz Quispe et al., 2018) y *Populus* spp. (Shifflett et al., 2016), lo que ha permitido reducir y en algunos casos, eliminar la necesidad del empleo de fertilizantes químicos, con beneficios económicos para el productor (Xie et al., 2019). Al mismo tiempo, este tipo de aguas mejoran de forma paulatina las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, que se refleja en una mejora de su fertilidad, debido a la cantidad de nitrógeno y fósforo (Muñoz Villalobos et al., 2017).

En el estado de Tlaxcala, México, la actividad acuícola existente se realiza en estanques y jagüeyes (depósito superficial de agua) de manera artesanal, en donde la carpa (*Cyprinus carpio*) y la tilapia (*Oreochromis* sp.) son las especies con mayor producción. Las aguas residuales de dichos depósitos son descargadas al suelo para la producción de cultivos y en algunos casos empleadas en sistemas acuapónicos (Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca, 2018). Sin embargo, se desconoce el efecto de la irrigación continua sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, por lo que con el uso de técnicas estadísticas multivariantes como el análisis de componentes principales (ACP), permitirá resumir un grupo numeroso de variables en unas pocas que recojan el mayor porcentaje de la variabilidad total (Vargas Diaz et al., 2021), lo que contribuirá a la toma de decisiones sobre el manejo y conservación del suelo (Álvarez-Arteaga et al., 2020).

El objetivo del presente trabajo consistió en evaluar las propiedades físicas, químicas y biológicas de suelos con irrigación continua de aguas residuales de la acuicultura e identificar las variables que aporten mayor información con relación a su comportamiento por la irrigación.

Materiales y métodos

Unidades de producción acuícola

Localización

Con base en una producción constante de peces durante el año 2018 y a una irrigación continua de suelos bajo cultivo con aguas residuales de la producción acuícola, se seleccionaron tres parcelas para llevar a cabo este estudio, las cuales se localizan al sur del estado de Tlaxcala, México (Cuadro 1). El área se encuentra bajo un

Cuadro 1. Superficie y manejo de las parcelas irrigadas con aguas residuales de la acuicultura, al sur del estado de Tlaxcala (México). 2018.

Table 1. Land surface and management of irrigated plots with aquaculture wastewater, at the south of the state of Tlaxcala (Mexico). 2018.

Parcela	Coordenadas geográficas	Altitud (m s.n.m.)	Superficie (m ²)	Manejo [†]
Los Capulines	19° 19' 14,5'' LN 98° 23' 60,8'' LO	2282	600	<i>Medicago sativa</i> L., 10 años de cultivo, aplicación de estiércol de borrego y conejo, 15 años de riego. Jagüey (<i>Cyprinus carpio</i>), con recambio de agua a los 30 días en 50 % y estanque (<i>Oreochromis</i> sp.), con recambio de agua tres o cuatro días al 45 %.
El Llano	19° 21' 32,0'' LN 98° 05' 36,5'' LO	2444	480	<i>Medicago sativa</i> L., 10 años de cultivo, aplicación de estiércol de ganado vacuno, seis años de riego. Estanque (<i>Oreochromis</i> sp.). Recambio de agua tres a cuatro días al 45 %.
San Miguel	19° 20' 11,9'' LN 98° 18' 40,3'' LO	2243	500	<i>Licopersicum esculentum</i> L., <i>Rosa</i> spp., aplicación de fertilizante inorgánico (urea), seis años de riego, invernadero. Estanque (<i>Oreochromis</i> sp.). Recambio de agua tres a cuatro días al 45 %.

[†]Información proporcionada por los productores. / [†]Information provided by the producers.

clima templado subhúmedo con lluvias en verano, con temperaturas de 12 a 16 °C y una precipitación de 800 a 1000 mm. El uso principal de los suelos es el agrícola en un 53 % (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2009). Sin embargo, son suelos poco profundos y de baja fertilidad limitada por una deficiencia de nitrógeno y fósforo.

Caracterización del suelo

El muestreo de suelo en cada parcela irrigada se realizó a una profundidad de 0-30 cm por el método de zig-zag, luego se colocaron sobre papel Kraft para secarse a temperatura ambiente y a la sombra, después se tamizó en malla 2 mm para obtener un tamaño de partícula homogéneo, de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2002). Se recolectaron nueve muestras simples (repeticiones) en cada parcela, lo que dio un total de veintisiete muestras de suelo. Cada parcela fue considerada como un tratamiento.

A cada muestra de suelo se le determinó el pH, mediante la relación suelo: agua 1:2 (p/v); materia orgánica por el método de oxidación en húmedo de Walkley y Black (Jackson, 1976); conductividad eléctrica en una suspensión suelo:agua (1:5 p/v), nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) por KCl 2 N (Álvarez Sánchez & Marín Campos, 2011); N total por el método Kjeldahl (Bremner, 1965); P disponible por el procedimiento de Bray y Kurtz 1 (Bray & Kurtz, 1945); K, Ca, Mg por la técnica con acetato de amonio pH 7; textura, por el hidrómetro de Bouyoucos (Rodríguez & Rodríguez, 2011) y densidad aparente, por el método de la probeta con base en la NMX-FF-109-SCFI-2007 (Secretaría de Economía, 2008).

La actividad microbiana, dada por la tasa respiratoria de los microorganismos, se determinó por el método de incubación en un medio cerrado con 3 mL de NaOH 0,5 M, descrito por Anderson (1982), el desprendimiento de CO_2 se estimó por titulación con HCl 0,5 N previo al adicionar 2 mL de BaCl_2 al 2 % y tres gotas de fenolftaleína al 1 %, se consideraron blancos. Las muestras de suelo se humedecieron al 60 % de su capacidad de campo, la incubación se realizó a 22 °C por 30 días, se utilizaron frascos de vidrio con capacidad de 250 mL y 50 g de suelo de cada una de las repeticiones. Las determinaciones de la cantidad de CO_2 se llevaron a cabo cada siete días y se reemplazó la trampa de CO_2 . La fórmula que indica Guerrero-Ortiz et al. (2012), se empleó para determinar la respiración microbiana; $R=(B-M) N * E$, donde, R=respiración microbiana en mg C- CO_2 , B=mL de HCL para titular el blanco, M=mL de HCl para titular la muestra, N=normalidad del HCL (0,5 N), E=peso equivalente del CO_2 igual a 22.

Análisis de los datos

Los datos obtenidos se sometieron a las pruebas de normalidad de Shapiro Wilks y homogeneidad de varianza (Prueba de Levene). Una vez verificados que se cumplieron los supuestos ($p \geq 0,05$) se aplicó un análisis de varianza y una comparación de medias bajo el método Tukey ($p \leq 0,05$), para identificar diferencias entre los tratamientos bajo el siguiente modelo: $Y_{ij} = \mu + t_i + e_{ij}$, donde: Y_{ij} = respuesta obtenida en la j-ésima repetición del i-ésimo tratamiento; t_i = efecto del tratamiento i ; e_{ij} = término de error aleatorio asociado a la observación Y_{ij} . Se realizó una correlación Pearson entre las variables ($p \leq 0,05$). Asimismo, se aplicó un análisis de componentes principales (ACP) para identificar las variables que expliquen la mayor variabilidad entre los tratamientos (parcelas). Lo anterior con el empleo del software estadístico InfoStat, versión 2017 (Di Rienzo et al., 2017).

Resultados

Caracterización del suelo

En los suelos de las parcelas bajo estudio, existió un predominio de la fracción arena, el porcentaje más alto se registró en el suelo de El Llano, en este mismo suelo se tuvo un valor mayor de densidad aparente, propiedad física que varía con la textura, contenido de materia orgánica y el manejo proporcionado al suelo. Dentro de las propiedades químicas, los suelos presentaron un pH neutro, pero en la parcela San Miguel existió un incremento ($p=0,0002$), al igual que en la concentración de sales, determinada por la conductividad eléctrica, valor que no refleja problemas de salinidad. En este mismo suelo, el contenido de materia orgánica, N total, K, Mg y NO_3^- , fueron significativamente mayores (Cuadro 2).

Cuadro 2. Análisis de varianza de las propiedades de suelos irrigados con aguas residuales acuícolas, al sur del estado de Tlaxcala, México. 2018.

Table 2. Variance analysis of the soil properties irrigated with aquaculture wastewater, at the south of the state of Tlaxcala, Mexico. 2018.

Parámetro	Los Capulines	El Llano	San Miguel
Densidad aparente (g cm^{-3})	1,15±0,03b	1,28±0,04a	1,19±0,05b
Arena (%)	79,27±13,27ab	87,64±3,08a	75,79±3,11b
Limo (%)	18,51±13,10a	8,16±3,56b	19,37±2,49a
Arcilla (%)	2,22±1,30b	4,20±0,88a	4,84±1,03a
pH	6,82±0,08b	6,76±0,07b	6,92±0,06a
Conductividad eléctrica (dS m^{-1})	0,04±0,01b	0,07±0,01b	0,62±0,53a
Materia orgánica (%)	2,09±0,24b	1,07±0,42c	2,55±0,41a
N total (%)	0,11±0,02b	0,06±0,01c	0,14±0,03a
P disponible (mg kg^{-1})	9,31±0,74b	31,89±11,44a	43,45±16,62a
K (mg kg^{-1})	335,1±21,8b	65,1±8,2c	842,1±16,8a
Ca (mg kg^{-1})	1474,5±147,7a	845,4±163,4b	379,3±539,1c
Mg (mg kg^{-1})	562,2±30,0b	289,8±29,6c	849,7±74,2a
NH_4^+ (mg kg^{-1})	12,99 ± 5,16ab	17,08±5,99a	10,60±4,04b
NO_3^- (mg kg^{-1})	7,07±2,49b	9,76 ± 1,47b	28,56±6,68a
Respiración microbiana (mg C-CO_2 100 g suelo ⁻¹)	11,03±3,03b	14,75±2,49a	10,35±2,66b

a, b, c. Medias con distinta letra en una misma fila son estadísticamente diferentes ($p \leq 0,05$). $n = 27$. N: nitrógeno, P: fósforo, K: potasio, Ca: calcio, Mg: magnesio, NH_4^+ : amonio, NO_3^- : nitrato / a, b, c. Means with different letter in a same row are statistically different ($p \leq 0,05$). $n = 27$. N: nitrogen, P: phosphorus, K: potassium, Ca: calcium, Mg: magnesium, NH_4^+ : ammonium, NO_3^- : nitrate.

En el caso del P, hubo un incremento significativo en los suelos de El Llano y San Miguel, como un posible efecto del riego continuo con las aguas residuales de la actividad acuícola. El elemento Ca en el suelo de Los Capulines, fue significativamente más alto, seguido de El Llano y San Miguel. En el caso del ion amonio (NH_4^+), este

tuvo un incremento en el suelo de El Llano, concentración que depende del manejo al suelo y el contenido de amonio en el agua residual. En cuanto a la respiración microbiana, como propiedad biológica determinada, en el suelo de esta misma parcela se observó un aumento en el CO₂, lo que refleja una mayor actividad biológica, que disminuyó para los suelos de Los Capulines y San Miguel (Cuadro 2).

Relación entre las propiedades del suelo

El análisis de correlación lineal de las quince variables del suelo (Cuadro 3), mostró 58 correlaciones significativas, la obtenida entre el pH y K se asoció significativa y positivamente ($r=1,00$), el pH es un indicador de la disponibilidad de nutrientes, el K es un elemento que a pH neutro (Cuadro 2) es más absorbido por las raíces de las plantas. La conductividad eléctrica correlacionó con el contenido de NO₃⁻ ($r=1,00$), significa que al existir un incremento en la concentración de nitratos se reflejará en el aumento de la conductividad eléctrica. La materia orgánica mostró una correlación con el contenido de NH₄⁺ ($r=1,00$), el ion amonio se incrementó a mayor degradación de la materia orgánica presente en el suelo. Lo que puede atribuirse, en este estudio, a la irrigación con las aguas residuales de la actividad acuícola. Este ion amonio a su vez correlacionó con la partícula arena ($r=1,00$). Existieron correlaciones negativas y significativas entre la materia orgánica y la partícula arena ($r=-1,00$), en suelos en donde predomina la fracción arena, se tendrá un menor porcentaje de materia orgánica, lo que se observó en los suelos de las tres parcelas bajo estudio (Cuadro 2). La concentración de N total correlacionó con el ion amonio ($r=-1,00$) y el CO₂ producto de la respiración microbiana del suelo que indicó una disminución con la partícula limo ($r=-1,00$) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Análisis de correlación de Pearson para las propiedades de los suelos irrigados con aguas residuales acuícolas, al sur del estado de Tlaxcala, México. 2018.

Table 3. Pearson correlation analysis for the soil properties irrigated with aquaculture wastewater, at the south of the state of Tlaxcala, Mexico. 2018.

	pH	CE	MO	P	DA	Arcilla	Limo	Arena	N total	K	Ca	Mg	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	CO ₂	
pH	1,00															
CE	0,93*	1,00														
MO	0,92*	0,71	1,00													
P	0,49	0,78	0,12 _{ns}	1,00												
DA	-0,58	-0,24 _{ns}	-0,85*	0,42	1,00											
Arcilla	0,40	0,72	0,02 _{ns}	0,99*	0,51	1,00										
Limo	0,81*	0,53	0,97*	-0,11 _{ns}	-0,95*	-0,22 _{ns}	1,00									
Arena	-0,92*	-0,70	-1,00*	-0,11 _{ns}	0,86*	-3,30E-03 _{ns}	-0,98*	1,00								
N total	0,95*	0,77	1,00*	0,21 _{ns}	-0,80*	0,11 _{ns}	0,95*	-0,99*	1,00							
K	1,00*	0,93*	0,92*	0,49	-0,59	0,40	0,81*	-0,92*	0,95*	1,00						
Ca	0,99*	0,97*	0,86*	0,61	-0,46	0,53	0,72	-0,85*	0,90*	0,99*	1,00					
Mg	0,99*	0,85*	0,97*	0,35 _{ns}	-0,71	0,25 _{ns}	0,89*	-0,97*	0,99*	0,99*	0,95*	1,00				
NH ₄ ⁺	-0,95*	-0,76	-1,00*	-0,19 _{ns}	0,81*	-0,09 _{ns}	-0,95*	1,00*	-1,00*	-0,95*	-0,89*	-0,99*	1,00			
NO ₃ ⁻	0,90*	1,00*	0,66	0,83*	-0,16 _{ns}	0,77	0,46	-0,64	0,72	0,89*	0,95*	0,81*	-0,70	1,00		
CO ₂	-0,85*	-0,59	-0,99*	0,04 _{ns}	0,93*	0,14 _{ns}	-1,00	0,99*	-0,97*	-0,85*	-0,77	-0,92*	0,97*	-0,52	1,00	

* $p \leq 0,05$. Coeficiente de correlación de Pearson, ns: no significativo. CE: conductividad eléctrica, MO: materia orgánica, P: fósforo, DA: densidad aparente, N: nitrógeno, K: potasio, Ca: calcio, Mg: magnesio, NH₄⁺: amonio, NO₃⁻: nitrato, CO₂: respiración microbiana. / * $p \leq 0,05$. Pearson's correlation coefficient, ns: not significant. CE: electric conductivity, MO: organic matter, P: phosphorus, DA: Bulk density, N: nitrogen, K: potassium, Ca: calcium, Mg: magnesium, NH₄⁺: ammonium, NO₃⁻: nitrate, CO₂: microbial respiration.

Las variables edáficas analizadas se agruparon en dos componentes principales, que en conjunto explicaron el 100 % de la varianza, lo que indica una buena reducción del comportamiento de las variables originales (Cuadro 4). El primer componente principal (11,42) explicó el 76 % de la varianza y se conformó por el pH, la materia orgánica, la partícula arena, el N total, K, Mg y NH_4^+ , componentes en donde se encontraron correlaciones altamente significativas (Cuadro 3); N total, K, Mg y NH_4^+ , son variables que están asociadas a lo que aporta el agua residual de la producción acuícola, los valores negativos que se presentaron en la partícula arena y el ion amonio se pudieran relacionar con su disponibilidad. El segundo componente principal (3,67) explicó el 23 % de la varianza y está representado por el P y el porcentaje de arcilla. Las variables de este componente se asocian a la adsorción por el componente de cambio que proporciona la partícula de arcilla.

Cuadro 4. Proporción de la variación explicada para cada componente principal en las propiedades de suelos irrigados con aguas residuales acuícolas, al sur del estado de Tlaxcala, México. 2018.

Table 4. Proportion of the variation explained for each principal component in the properties of soils irrigated with aquaculture wastewater, at the south of the state of Tlaxcala, Mexico. 2018.

Componente	Valor	% Varianza	% Varianza acumulada
1	11,42	0,76	0,76
2	3,58	0,24	1,00
Autovectores			
Parámetro		CP1	CP2
pH		0,29	0,08
Conductividad eléctrica		0,25	0,27
Materia orgánica		0,29	-0,13
Fósforo		0,10	0,51
Densidad aparente		-0,21	0,38
Arcilla		0,08	0,51
Limo		0,26	-0,24
Arena		-0,29	0,13
N total		0,29	-0,08
K		0,29	0,08
Ca		0,27	0,15
Mg		0,30	-3,9E-03
NH_4^+		-0,29	0,09
NO_3^-		0,24	0,31
Respiración microbiana		-0,27	0,21

Cada variable del suelo tuvo un efecto por parcela, lo que denotó la diferencia entre ellas (Figura 1). En el caso de la parcela San Miguel, el contenido de Ca, K, Mg y pH, tuvieron un mayor efecto y fueron las variables que conformaron el primer componente principal (CP1), el pH tuvo un efecto sobre la disponibilidad de estos macronutrientes en el suelo de esta parcela, mientras que, en la parcela El Llano, lo fueron el NH_4^+ , la partícula arena y la respiración microbiana, también dentro del CP1. En el suelo de esta parcela el reúso del agua residual de la acuicultura es importante, pero dado que es un suelo en donde predomina la fracción arena, este ion se puede lixiviar.

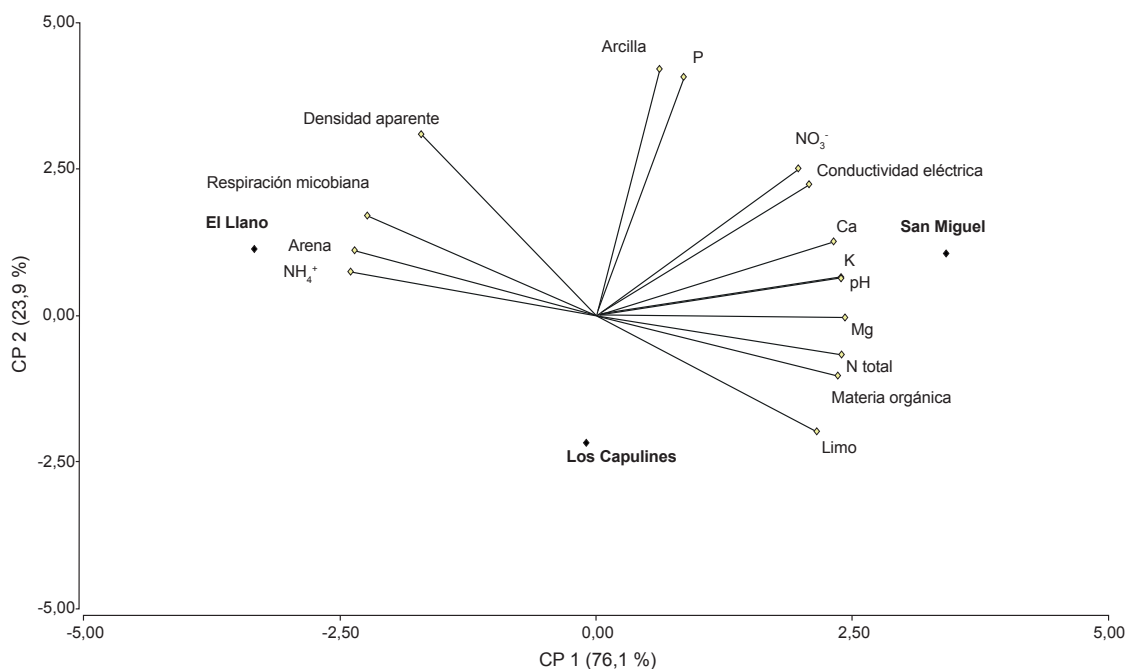


Figura 1. Gráfico biplot de las propiedades de suelos irrigados con aguas residuales acuícolas, al sur del estado de Tlaxcala, México. 2018. CP: componente principal. Parcelas: San Miguel, El Llano y Los Capulines.

Figure 1. Biplot graph of the soil properties irrigated with aquaculture wastewater, at the south of the state of Tlaxcala, Mexico. 2018. CP: main component. Plots: San Miguel, El Llano and Los Capulines.

Discusión

En suelos de Tlaxcala se reportó un 53,8 % de arena a una profundidad de 24-50 cm y de 61,3 % de 27-67 cm (Govaerts et al., 2008), menor a lo encontrado en los suelos analizados en este estudio (Cuadro 2). Los suelos con una mayor proporción de arena presentaron alta conductividad hidráulica y baja retención de humedad, pobre fertilidad y alta densidad aparente, la cual de forma particular establece una relación con otras propiedades del suelo (Gama-Castro et al., 2007), debido a que al incrementarse su valor, se presenta un problema de compactación, que afecta la aireación y retención de humedad para un crecimiento favorable de las raíces de las especies vegetales, así como de los microorganismos del suelo (Espinosa Ramírez et al., 2011). Los suelos analizados presentaron un valor de densidad aparente mayor a 1,0 g cm⁻³, de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) para suelos derivados de cenizas volcánicas, situación que puede representar un problema desde el punto de vista del manejo agrícola. Las propiedades físicas del suelo son aquellas que pueden observarse y/o medirse sin alterar su composición química y están relacionadas con el movimiento del aire, agua, raíces y nutrientes (López & Estrada, 2015).

Respecto a las propiedades químicas determinadas en suelos irrigados con aguas residuales de la acuicultura, se ha reportado un pH de 8,33, mayor al pH neutro encontrado en los suelos bajo estudio; una conductividad eléctrica de 0,31 dS m⁻¹, la cual fue menor a lo que se reportó en el suelo de la parcela San Miguel, de 0,62 dS m⁻¹, variables que van a depender de la capacidad de carga productiva de peces en las unidades de producción (Chen et al., 2017); sin embargo, es un valor que no representa problemas de salinidad para el suelo de esta parcela, dado que es menor

a 1 dS m^{-1} , y está de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). En otro estudio en donde se evaluó un suelo irrigado con aguas residuales acuícolas de manera continua, se reportó un pH de 5,55 y una conductividad eléctrica de $2,71 \text{ dS m}^{-1}$, superior a la que se tuvo en los suelos bajo estudio, lo que va a depender de la biomasa presente, el tipo de producción y del manejo de la unidad de producción acuícola, así como al suelo (Oladimeji et al., 2020).

Respecto al contenido de materia orgánica en los suelos analizados, este fue considerado de muy pobre ($<1,2 \%$) a pobre ($1,2 - 2,9 \%$), según Fassbender & Bornemisza (1987) (Cuadro 2), por lo que se pueden considerar suelos degradados por su baja fertilidad. En un suelo agrícola cercano al área de estudio, se reportó un valor bajo de materia orgánica ($1,96 \%$), lo que propicia una menor actividad biológica y disponibilidad de nutrimentos (Govaerts et al., 2008). Además, se tuvieron valores contrastantes de materia orgánica en suelos agrícolas localizados al norte del estado de Tlaxcala, respecto a los obtenidos en los suelos analizados, en promedio $3,03 \%$, sin embargo, el valor es considerado muy bajo de acuerdo con la normatividad mexicana (Soto-Mora et al., 2016).

En cuanto a la fertilidad, condición nutrimental de los suelos, el contenido de N total fue bajo ($<0,30 \%$) según la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), lo que coincidió con Chen et al. (2017), quienes reportaron una concentración de $0,04 \%$ en suelos irrigados con aguas de la producción acuícola, aún más baja que la obtenida en el suelo de El Llano de $0,06 \%$. Los suelos pueden contener entre $0,02$ y $0,4 \%$ de N total y por lo general, más del 98% se encuentra en forma orgánica (Rodríguez & Rodríguez, 2011). Por lo que el irrigar suelos con aguas residuales de la producción acuícola, va a permitir una mayor disponibilidad de este nutrimento y con ello, mejorar la fertilidad del suelo y por tanto, su actividad biológica. Respecto al contenido de nitrato en los suelos analizados, se observó un valor alto ($21-40 \text{ mg kg}^{-1}$) en el suelo de San Miguel, no así en los suelos de Los Capulines y El Llano, donde se consideró bajo ($4-10 \text{ mg kg}^{-1}$) con base a lo que propone Vázquez (1997). Este ion es la forma disponible para las plantas, por lo que la irrigación con aguas residuales de la acuicultura va a favorecer la fertilidad del suelo y por consiguiente, mejorar el desarrollo de los cultivos.

En el caso del ion amonio, se tuvo un valor promedio de $13,55 \text{ mg kg}^{-1}$ en los suelos analizados, menor al intervalo de 22 a 24 mg kg^{-1} que reportaron Cristóbal-Acevedo et al. (2011) para suelos agrícolas, estos autores señalaron que la concentración de este ion depende del manejo que se le realice al suelo, además el mismo tiene una menor movilidad dentro del perfil del suelo, debido a que las arcillas y el componente orgánico, por su carga negativa, permiten que se adsorba en tanto se transforma por el proceso de nitrificación (Lockhart et al., 2013); por lo que la irrigación continua al suelo con aguas residuales de la acuicultura, proporciona una cantidad de este ion, que dependerá de la carga de peces y el tipo de alimento (Ciji & Akhtar, 2020).

En cuanto al contenido de P, este fue menor a 15 mg kg^{-1} en el suelo de Los Capulines y alto ($>30 \text{ mg kg}^{-1}$) en los suelos de El Llano y San Miguel, según la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), valores superiores al $7,87 \text{ mg kg}^{-1}$ que reportaron Chen et al. (2017) en suelos irrigados con aguas de la actividad acuícola. Además, en suelos irrigados con esta misma clase de aguas, se reportó una concentración de P de $16,08 \text{ mg kg}^{-1}$ (Oladimeji et al., 2020), menor a lo encontrado en los suelos de San Miguel y El Llano, pero mayor en el suelo de Los Capulines. Por lo que el aporte de este nutrimento al suelo vía la aplicación de las aguas residuales de la acuicultura, es de gran importancia, dado que en suelos con deficiencia de este nutrimento el aplicarlo va a permitir cubrir las necesidades de los cultivos, ya que del 30 al 85% del P en el suelo se encuentra en forma orgánica, asociado a la materia orgánica, como componente de los microorganismos y forma parte de la fracción sólida (Porta et al., 2003).

Independiente del manejo proporcionado a las unidades de producción acuícola, el agua residual, por lo general, presenta bajas concentraciones de K y una ausencia de Fe y B, lo que puede afectar el crecimiento y desarrollo de las plantas (Villalobos-Reyes & González-Pérez, 2016), pero al contrario del agua, los sedimentos de los sistemas de producción acuícola contienen concentraciones altas de Ca ($>2000 \text{ mg kg}^{-1}$) y Mg ($>1000 \text{ mg kg}^{-1}$), por la aplicación de cal $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ como parte del manejo a las unidades de producción (Yuvanatemiyá & Boyd,

2006). La aplicación constante de aguas residuales de la acuicultura al suelo, va a incrementar las concentraciones de estos elementos, como lo reportaron Chen et al. (2017), quienes obtuvieron valores de 4,77, 10,03 y 11,09 mg kg⁻¹ de K, Ca y Mg, respectivamente, valores menores a los encontrados en este estudio (Cuadro 2). En el caso del K, las concentraciones fueron altas (>235 mg kg⁻¹) en los suelos de Los Capulines y San Miguel y un contenido medio (60-235 mg kg⁻¹) en el suelo de El Llano, de acuerdo a la clasificación de Landon (1984). Respecto al Ca, el suelo de Los Capulines fue medio (1000-2500 mg kg⁻¹), bajo (500-1000 mg kg⁻¹) en El Llano y alto (2500-5000 mg kg⁻¹) en el suelo San Miguel; mientras que, los niveles de Mg se consideraron muy altos (>120 mg kg⁻¹) en los suelos bajo estudio, según Vázquez (1997). En otros suelos en donde se aplicó el agua residual de la acuicultura, se reportaron concentraciones de 666 a 2 264 mg kg⁻¹ para Ca, 47,58 a 123,22 mg kg⁻¹ de Mg y de 35,19 a 58,65 mg kg⁻¹ de K, lo que depende de la calidad y cantidad de alimento proporcionado a los peces y de la densidad de siembra, así como del tipo de suelo (González Acosta, 2012).

La actividad microbiana es una propiedad útil para conocer la actividad biológica de un suelo, por lo que en un suelo no perturbado puede existir una cantidad de 74,4 mg C-CO₂ 100 g⁻¹ suelo (Amaro et al., 2019), valor menor a lo encontrado en los suelos bajo estudio, en particular en el suelo de San Miguel, que se obtuvo 10,35 mg C-CO₂ 100 g⁻¹ suelo, seguido del 11,03 en Los Capulines y de 14,75 en El Llano. El agua que proviene de la actividad acuícola contiene una mayor cantidad de sales, lo que incrementa el pH (Ciji & Shahbaz Akhtar, 2020) y se reflejó en una reducción de la diversidad y de las funciones de los microorganismos del suelo (Chen et al., 2017), lo cual se observó en el suelo de San Miguel, que presentó un pH de 6,92 y la menor actividad microbiana, dada por la cuantificación de CO₂.

Al analizar las diferentes relaciones entre las variables determinadas, la materia orgánica, la conductividad eléctrica y el pH, son propiedades químicas del suelo que intervienen en la dinámica del K, N total y el ion nitrato. En el agua de los sistemas de producción acuícola el pH es por lo general alcalino, razón por la cual, al descargar las aguas residuales, se puede afectar esta propiedad, ya que a un pH de 5,8 se considera que existe una mayor disponibilidad de nutrimentos como el K y N (Ciji & Shahbaz Akhtar, 2020).

En suelos donde predomina la partícula arena, el contenido de materia orgánica es bajo (0,70 %), como lo encontrado por Flores Márgez et al. (2013), lo que coincide con los resultados obtenidos en este estudio en los tres suelos analizados. El ión amonio (NH₄⁺) se adsorbe por las arcillas, pero el ion nitrato (NO₃⁻) se repele, debido a las cargas negativas presentes en el coloide inorgánico y del ion, por lo que los nitratos se pueden lixiviar hacia el manto acuífero con mayor facilidad (Luna-Imbacuán et al., 2016), entonces si existe un riego excesivo y constante con aguas residuales permite que exista una lixiviación de nitratos y será mayor si predomina la fracción arena, como los suelos bajo estudio (Cuadro 2).

La variabilidad en las propiedades edáficas de las parcelas es efecto del propio sitio y de la aplicación de las aguas residuales, así como del manejo proporcionado, aquellas variables que mostraron un mayor peso en el CP1 en este estudio fueron el pH, la materia orgánica, el porcentaje de la partícula de arena, N total, K, Mg y NH₄⁺, si bien el contenido de nutrimentos está en función de la dinámica de la materia orgánica, esta fue baja en los suelos de las parcelas (Cuadro 2), por lo que el contenido nutrimental puede deberse a la aplicación del agua residual acuícola, debido a que trae consigo concentraciones altas de nitrógeno y fósforo (Xie et al., 2019), mientras que en el CP2 lo conformaron la concentración de fósforo y el contenido de arcilla. Al analizar las características físicas y químicas de suelos derivados de cenizas volcánicas a través de un ACP, se obtuvo que variables como la conductividad eléctrica, Ca, Al, B, humedad, capacidad de campo y punto de marchitez explicaron el 48,8 %, condición que depende del manejo, tipo de suelo, vegetación presente o cultivo (Rosero et al., 2019). Una irrigación constante con aguas residuales provenientes de la acuicultura, sobre todo cuando existe un manejo inadecuado, mostrará un incremento de la concentración de sales en el suelo, así como de contaminantes (inorgánicos y orgánicos) y patógenos, lo que puede repercutir en una reducción de la actividad y diversidad microbiana y, por consiguiente, afectar otras funciones del suelo, como el ciclado de nutrimentos (Chen et al., 2017). Son varias las ventajas de

reutilizar aguas residuales con fines agrícolas, en particular donde se carece de este recurso y la fertilidad de los suelos sea baja; sin embargo, los impactos al irrigar con aguas residuales deben evaluarse, no solo a partir de la perspectiva del punto de vista social, económico y ambiental, sino también sostenible (Odoemena et al., 2020). Dada esta condición, la acuicultura y agricultura podrían ser una opción viable para el ahorro de agua, con el reúso de las aguas residuales de este sector, se mejora la capacidad productiva de los suelos, lo que traería consigo beneficios económicos para el productor.

Conclusiones

Los resultados muestran que la irrigación con aguas residuales de la acuicultura tiene implicaciones positivas sobre la fertilidad del suelo, lo que conlleva beneficios de mejora de la calidad del mismo. Con el análisis de componentes principales fue posible identificar que el pH, la materia orgánica, la partícula de arena, el nitrógeno total, el potasio, el magnesio, el amonio, el fósforo y la partícula arcilla, explican el comportamiento de los suelos irrigados con aguas residuales de la acuicultura, lo que sugiere que estas propiedades físicas y químicas se pueden considerar como indicadores de monitoreo para suelos irrigados con este tipo de aguas, lo que apoyaría a la toma de decisiones sobre su manejo.

Agradecimientos

Se agradece ampliamente al presidente, productores y personal que conforman el CESATLAX, S.C. del estado de Tlaxcala, México, por otorgar el apoyo para realizar este trabajo.

Referencias

- Alcarraz Quispe, E. W., Tapia Figueras, M. L., Bustamante Pezoa, A., Tapia Laguna, O., Wacyk Gonzales, J., & Escalona Contreras, V. H. (2018). Evaluación de la concentración de nitratos, calidad microbiológica y funcional en lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivadas en los sistemas acuapónico e hidropónico. *Anales Científicos*, 79(1), 101–110. <https://doi.org/10.21704/ac.v79i1.1145>
- Álvarez-Arteaga, G., Ibáñez-Huerta, A., Orozco-Hernández, M., & García-Fajardo, B. (2020). Regionalización de indicadores de calidad para suelos degradados por actividades agrícolas y pecuarias en el altiplano central de México. *Quivera Revista de Estudios Territoriales*, 22(2), 5–19. <https://quivera.uaemex.mx/article/view/13302>
- Álvarez Sánchez, E., & Marín Campos, M. A. (2011). *Manual de procedimientos analíticos para suelos y plantas*. Universidad Autónoma Chapingo. <https://bit.ly/3OIU5xr>
- Amaro, E. J., Márquez, E., & Llanes, J. M. (2019). Diagnóstico inicial de la evolución de un suelo degradado. *Avances*, 21(1), 129–138. <https://www.ciget.pinar.cu/ojs/index.php/publicaciones/article/view/422>
- Anderson, J. P. (1982). Soil respiration. In A. L. Page, R. H. Miller, & D.R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties* (2nd ed., pp. 831–871). Soil Science Society of America, Madison.
- Bray, R. H., & Kurtz, T. L. (1945). Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Science*, 59(1), 39–45. <https://bit.ly/3XIHCh3>

- Bremner, J. M. (1965). Total nitrogen. In A. G. Norman, (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and microbiological properties* (2nd ed., pp. 1149–1178). American Society of Agronomy.
- Chen, L., Feng, Q., Li, C., Wei, Y., Zhao, Y., Feng, Y., Zheng, H., Li, F., & Li, H. (2017). Impacts of aquaculture wastewater irrigation on soil microbial functional diversity and community structure in arid regions. *Scientific Reports*, 7, Article 11193. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11678-z>
- Ciji, A., & Shahbaz Akhtar, M. (2020). Nitrite implications and its management strategies in aquaculture: a review. *Reviews in Aquaculture*, 12(2), 878–908. <https://doi.org/10.1111/raq.12354>
- Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca. (2018). *Anuario estadístico de acuicultura y pesca 2018*. https://nube.conapesca.gob.mx/sites/cona/dgppe/2018/ANUARIO_2018.pdf
- Cristóbal-Acevedo, D., Álvarez-Sánchez, M. E., Hernández-Acosta, E., & Améndola-Massiotti, R. (2011). Concentración de nitrógeno en suelo por efecto de manejo orgánico y convencional. *Terra Latinoamericana*, 29(3), 325–332. <https://bit.ly/3AX10ND>
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, G., González, L., Tablada, M., & Robledo, C. (2017). *InfoStat (versión 2017)*. Universidad Nacional de Córdoba.
- Endut, A., Jusoh, A., Ali, N., Wan, Nik, W. B., & Hassanm, A. A. (2010). Study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresource Technology*, 101(5), 1511–1517. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.040>
- Espinosa Ramírez, M., Andrade Limas, E., Rivera Ortiz, P., & Romero Díaz, A. (2011). Degradación de suelos por actividades antrópicas en el norte de Tamaulipas, México. *Papeles de Geografía*, 53-54, 77–88. <https://revistas.um.es/geografia/article/view/143451>
- Fassbender, W. H., & Bornemisza, E. (1987). *Química de suelos, con énfasis en suelos de América Latina*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Flores Márgez, J. P., Valero Córdoba, C., Osuna Ávila, P., Corral Díaz, B., Shukla, M. K., & Salazar Sosa, E. (2013). Textura del suelo y tipo de agua de riego en la disponibilidad de fósforo de estiércol bovino. *Terra Latinoamericana*, 31(3), 211–220. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/287>
- Gama-Castro, J., Solleiro-Rebolledo, E., Flores-Román, D., Sedov, S., Cabadas-Báez, H., & Díaz-Ortega, J. (2007). Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del Glacis de Buenavista, Morelos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LIX(1), 133–145. <https://doi.org/10.18268/bsgm2007v59n1a11>
- González Acosta, J. A. (2012). Uso y manejo de sedimentos provenientes de piscicultura como base para el manejo sostenible: revisión del tema. *Revista Ciencia Animal*, 1(5), 121–143. <https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1053&context=ca>
- González-Fragozo, H. E., Zabaleta-Solano, C., Devia-González, J., Moya-Salinas, Y., & Anfanador-Rico, O. (2020). Efecto del riego con agua residual tratada sobre la calidad microbiológica del suelo y pasto King Grass. *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*, 23(2), Article e1513. <https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1513>
- Govaerts, B., Barrera-Franco, M. G., Limón-Ortega, A., Muñoz-Jiménez, P., Sayre, K. D., & Deckers, J. (2008). Clasificación y evaluación edafológica de tres sitios experimentales del altiplano central de México. *Tropicultura*, 26(1), 2–9. <http://www.tropicultura.org/text/v26n1/2.pdf>

- Guerrero-Ortiz, P., Quintero-Lizaola, R., Espinoza-Hernández, V., Benedicto-Valdés, G., & Sánchez-Colín, M. J. (2012). Respiración de CO₂ como indicador de la actividad microbiana en abonos orgánicos de *Lupinus*. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 355–362. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/1091/1337>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Ixtacuixtla de Mariano Matamoros, Tlaxcala*. DocPlayer. <https://bit.ly/3EGCe5m>
- Jackson, M. L. (1976). *Análisis químico de suelos*. Editorial Omega.
- Landon, J. R. (1984). *Booker tropical soil manual*. Booker Agriculture International Limited.
- Lockhart, K. M., King, A. M., & Harter, T. (2013). Identifying sources of groundwater nitrate contamination in a large alluvial groundwater basin with highly diversified intensive agricultural production. *Journal Contamination Hydrology*, 151, 140–154. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2013.05.008>
- López, D. M., & Estrada, M. H. (2015). Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. *Bioagrobiencias*, 8(1), 3–11.
- Luna-Imbacuán, M. A., Campos-Bermúdez, F., & Medina-Gutiérrez, O. (2016). Evaluación de las aguas residuales del lavado de estanques multipropósito con cultivo de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 17(2), 191-202. <https://revistacta.agrosavia.co/index.php/revista/article/view/488/388>
- Mangmang, J. S., Deaker, R., & Rogers, G. (2016). Response of cucumber seedlings fertilized with fish effluents to *Azospirillum brasiliense*. *International Journal of Vegetable Science*, 22(2), 129–140. <https://doi.org/10.1080/19315260.2014.967433>
- Muñoz Villalobos, J. A., Macías Rodríguez, H., Delgado Ramírez, G., Rivera González, M., Inzunza Ibarra, A., & Jacobo Salcedo, M. del R. (2017). Niveles de nitrógeno y fósforo en maíz (*Zea mays* L.) forrajero bajo riego con aguas residuales tratadas. *Agrofaz*, 17(2), 45–52.
- Odoemena, K. I., Rowshon, K. M. D., & Hasfalina Binti, C. M. (2020). Advances in utilization of wastewater in agricultural practice: a technical note. *Irrigation and Drainage*, 69(1), 149–163. <https://doi.org/10.1002/ird.2384>
- Oladimeji, S. A., Okomoda, V. T., Olufeagba, S. O., Solomon, S. G., Abol-Munafi, A. B., Alabi, K. I., Ikhwanuddin, M., Martins, C. O., Umaru, J., & Hassan, A. (2020). Aquaponics production of catfish and pumpkin: Comparison with conventional production systems. *Food Science Nutrition*, 8(5), 2307–2315. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1512>
- Omotade, I. F., Alatise, M. O., & Olanrewaju, O. O. (2019). Recycling of aquaculture wastewater using charcoal based constructed wetlands. *International Journal Phytoremediation*, 21(5), 399–404. <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1537247>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2016). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura. Contribución a la seguridad alimentaria y la nutrición para todos*. <https://www.fao.org/3/i5555s/i5555s.pdf>
- Porta, C. J., López-Acevedo, M., & Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (3ª ed.). Ediciones Mundi-Prensa.
- Rodríguez, F. H., & Rodríguez, A. J. (2011). *Métodos de análisis de suelos y plantas*. Editorial Trillas.
- Rosero, J., Vélez, J., Burbano, H., & Ordóñez, H. (2019). Cuantificación de la respiración y biomasa microbiana en Andisoles del sur de Colombia. *Agro Sur*, 47(3), 15–25. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2019.v47n3-03>
- Secretaría de Economía. (2008). *Norma oficial mexicana NMX-FF-109-SCFI-2007. Humus de lombriz (lombricomposta)-especificaciones y métodos de prueba*. <https://bit.ly/2Ba4BbB>

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). *Norma oficial mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis*. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>
- Shifflett, S. D., Culbreth A., Hazel, D., Daniels, H., & Nichols, E. G. (2016). Coupling aquaculture with forest plantations for food, energy, and water resiliency. *Science of the Total Environment*, 571, 1262–1270. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.161>
- Soto-Mora, E. S., Hernández-Vázquez, M., Luna-Zendejas, H. S., Ortiz-Ortiz, E., & García-Gallegos, G. E. (2016). Evaluación del contenido de materia orgánica en suelos agrícolas y su relación carbono/nitrógeno. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 3(5), 98–105. <http://www.reibci.org/publicados/2016/oct/1800105.pdf>
- Turcios, A. E., & Papenbrock J. (2014). Sustainable treatment of aquaculture effluents-what can we learn from the past for the future? *Sustainability*, 6(2), 836–856. <https://doi.org/10.3390/su6020836>
- Valenti, W. C., Kimpara, J. M., Preto, B. de L., & Moraes-Valenti, P. (2018). Indicators of sustainability to assess aquaculture systems. *Ecological Indicators*, 88, 402–413. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.068>
- Vargas Diaz, R. E., Galindo Pacheco, J. R., & Giraldo Henao, H. (2021). Análisis espacial de propiedades físicas del suelo de la Hoya del río Suárez, Boyacá-Santander (Colombia), utilizando componentes principales. *Investigación Agraria*, 23(1), 8–16. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2021.junio.2301657>
- Vázquez, A. A. (1997). *Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo* (2ª ed.). Universidad Autónoma Chapingo.
- Villalobos-Reyes, S., & González-Pérez, E. (2016). Determinación de la relación pez planta en la producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* L.) en sistema de acuaponía. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(5), 983–992. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i5.225>
- Xie, Y., Wang, Z., Guo, X., Lakthan, S., Chen, S., Xiao, Z., & Alhaj Hamoud, Y. (2019). Effects of different irrigation treatments on aquaculture purification and soil desalination of paddy fields. *Water*, 11(7), Article 1424. <https://doi.org/10.3390/w11071424>
- Yuvanatemiy, V., & Boyd, C. E. (2006). Physical and chemical changes in aquaculture pond bottom soil resulting from sediment removal. *Aquacultural Engineering*, 35(2), 199–205. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2006.02.001>
- Zhang, Q., Achal, V., Xu, Y., & Xiang, W. -N. (2014). Aquaculture wastewater quality improvement by water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsskal) floating bed and ecological benefit assessment in ecological agriculture district. *Aquacultural Engineering*, 60, 48–55. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.04.002>