

# Análisis de variables fisicoquímicas y nitrógeno en suelos del estado de Hidalgo



## Colaboración

Luis Felipe Juárez Santillán; Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora; Rosa Icela Beltrán Hernández; Carlos Alexander Lucho Constantino, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo; Georgina Martínez Reséndiz; Juan José Balderas Pérez, Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora

**RESUMEN:** La evaluación de lixiviación de nitrógeno en suelos, es de importancia, para poder analizar la posible contaminación de cuerpos de agua y por lo tanto denotar malas prácticas agrícolas poco sustentables y amigables con el medio ambiente. Los objetivos de este trabajo, fueron evaluar la lixiviación de nitrógeno, así como la variación de las variables fisicoquímicas, con el fin de determinar el estado actual del suelo en diferentes profundidades (0-90 cm); además, realizar un análisis de ANOVA, prueba de Tukey y correlación de Pearson, para conocer las principales interacciones entre las variables analizadas, y ver su diferencia estadística. Los principales resultados indican que la capa arable está sufriendo un deterioro, ya que los mayores contenidos de arcilla, nitrógeno, sales y fósforo tienden a aparecer en profundidades superiores de 30 cm; siendo esto un problema si llegan a manto freático, ya que pueden causar contaminación de este compartimento ambiental.

**PALABRAS CLAVE:** correlación, nitrógeno, variables fisicoquímicas, nitratos, amonio y suelo.

**ABSTRACT:** The evaluation of nitrogen leaching in soils is important, in order to evaluate the possible contamination of bodies of water and therefore denote poor agricultural practices that are not very sustainable and are friendly to the environment. The objectives were to evaluate the nitrogen leaching, as well as the variation of the physicochemical variables of the soil in different depths (0-90 cm); In addition, perform an ANOVA analysis, Tukey test and Pearson correlation, to see the main interactions between the analyzed variables, as well as their statistical difference. The main results indicate that the arable layer is suffering deterioration, since the highest clay, nitrogen, salts and phosphorus contents tend to appear at depths greater than 30 cm; these being a problem if they reach the groundwater, causing contamination of this environmental compartment.

**KEYWORDS:** correlation, nitrogen, physicochemical variables, nitrates, ammonium and soil.

## INTRODUCCIÓN

La contaminación de los suelos por metales pesados y el aumento en el contenido de nitrógeno (N) en estos ha incrementado considerablemente, debido al empleo intensivo de agroquímicos y riego con aguas residuales [1 y 2]. Esta problemática ocurre en zonas agrícolas cercanas a las grandes urbes, donde el volumen de agua residual industrial y municipal cada vez es mayor.

El riego con agua residual, también impacta de forma positiva en los suelos, incrementando fertilidad, la cual se asocia con la humedad) [3, 4]; el riego intensifica las actividades micro y macro-

biológicas, la materia orgánica (MO) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) [5, 6 y 7].

El empleo de agua residual se debe a la escasez de este recurso y del incremento en la demanda de alimentos. Los principales efectos del agua residual es el aumento excesivo de algunos nutrientes en el suelo y conjugado con un riego intensivo, propicia lixiviación de estos, afectando a cuerpos de agua [8, 9 y 10].

El Valle del Mezquital está ubicado al norte de la Zona metropolitana en una altitud entre 1700 a 2100 metros sobre el nivel del mar (msnm) [11]. Por más de cincuenta años, el agua residual del Valle de México, llega al Valle del Mezquital; ésta es empleada para riego de los campos agrícolas, en la cual se han detectado la presencia de coliformes fecales ( $0-2 \text{ NMP} \cdot 100\text{mL}^{-1}$ ), nitratos ( $10 \text{ mgNO}_3^- \cdot \text{L}^{-1}$ ), nitrógeno amoniacal ( $0.5 \text{ mg NH}_4^+ \cdot \text{L}^{-1}$ ), mercurio ( $0.001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), plomo ( $0.025 \text{ mg L}^{-1}$ ), sodio ( $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) y sólidos totales disueltos ( $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) [13 y 14]. Es muy probable que la calidad de este tipo de agua esté causando efectos negativos en las variables fisicoquímicas del suelo y en la lixiviación de nitrógeno [15].

Este estudio se realizó en Santa María Amajac, Estado de Hidalgo, dicha comunidad pertenece al Valle del Mezquital. El objetivo fue evaluar variables fisicoquímicas en diferentes profundidades del suelo (0-90 cm), así como la lixiviación de N; además, realizar análisis estadísticos (ANOVA, prueba de Tukey y correlación de Pearson), para conocer las interacciones entre las variables analizadas y su diferencia estadística. Las variables analizadas fueron: materia orgánica (MO), pH, conductividad eléctrica en el extracto de saturación ( $\text{CE}_s$ ), capacidad de intercambio catiónico (CIC), textura, cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), fósforo ( $\text{P-PO}_4^{3-}$ ) y el contenido de N inorgánico ( $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ ), los resultados se espera que den un panorama de la lixiviación de N, el cual pueda estar impactando a mantos freáticos, el análisis estadístico permitirá inferir el posible impacto que esté sufriendo el suelo; con lo cual se podrán proponer estrategias que ayuden a una agricultura sustentable en esta región.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Las muestras de suelo se recolectaron en Santa María Amajac, Hidalgo, en una parcela de una superficie de una hectárea (12 puntos de muestreo); en este lugar se utiliza agua residual proveniente de la Ciudad de México por más 30 años. La comunidad se localiza en las siguientes coordenadas geográficas: longitud norte  $20^\circ 19' 26''$ , longitud oeste  $98^\circ 44' 35''$  y 1680 msnm.

De cada profundidad (0-30, 30-60 y 60-90 cm; imagen 1, 2 y 3), se recolectaron 12 muestras simples, se mezclaron perfectamente para obtener una muestra compuesta por el método del cuarto [16] (Imagen 4). Las muestras fueron obtenidas con un barreno de material de acero al carbono.



Figura 1. Muestra de 0-30 cm de profundidad  
Elaboración propia.



Figura 2. Muestra de 30-60 cm de profundidad  
Elaboración propia.

Las muestras fueron guardadas en bolsas de polietileno de dos kilos; luego secadas a temperatura ambiente, posteriormente se tamizaron con la ayuda de un tamiz con malla de 2 mm de diámetro (certificado NIST, tamiz de Fisher Scientific Company).



Figura 3. Muestra de 30-60 cm de profundidad



Figura 4. Muestra compuesta

Conforme a la NOM-021 [16], se analizó: MO, pH,  $CE_s$ , CIC, textura,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$  y  $P-PO_4^{3-}$ . Se determinó el contenido de N inorgánico ( $NO_3^-$  y  $NH_4^+$ ), conforme a los métodos reportados por Yúfera y Carrasco [17].

Se realizó un análisis estadístico de ANOVA de un factor, prueba de Tukey y Correlación de Pearson con el programa estadístico SPSS versión 25.

## RESULTADOS

Los valores de las propiedades fisicoquímicas se muestran en el ANEXO 1.

### pH de los suelos

El pH varió entre 7.14 a 8.85 (Tabla 1, ANEXO 1). Boul-

ding [18] y la NOM-021 [16] consideran a estos valores como neutros, ligeramente alcalinos a fuertemente alcalinos, los valores son cercanos a los que Flores [19], reportaron para suelos del DR03 (valores entre 7.86 a 8.70). Esto indica que el pH se ha mantenido constante. El pH en los cinco muestreos fue variable, pero nunca salió del intervalo de alcalinidad. Durante el segundo muestreo se presentó una disminución de pH. Seoáñez [20], mencionan que la acidez de un suelo puede deberse al arrastre o lavado de sales y como consecuencia, entre otros factores de vertidos de aguas residuales industriales o de cualquier otro tipo de vertido y por la siembra de un solo cultivo.

### Conductividad Eléctrica, Sulfatos y Cloruros

La  $CE_s$  varió entre 0.63 y 2.33  $dS \cdot m^{-1}$ , clasificándose como suelo no salino y ligeramente salino. Los valores elevados de  $CE_s$  los presentó la capa arable (0-30 cm), con base en la clasificación de la NOM-021 [16] y Boulding [18], se pueden considerar que no presenta problemas de salinidad.

Los valores de cloruros (21.70 a 236.52  $mg \cdot kg^{-1}$ ) y sulfatos (0.12 a 10.86  $mg \cdot kg^{-1}$ ), a lo largo de las profundidades indican que el suelo presenta lixiviación de estos iones. Los  $SO_4^{2-}$  y  $Cl^-$  propician la salinidad en suelos y estrés hídrico en plantas, ya que sus sales correspondientes tienen alta solubilidad [21].

### Capacidad de Intercambio Catiónico

La CIC varió entre 20.81 a 48.71 ( $cmol (+) \cdot kg^{-1}$ ), clasificándose como media a muy alta con base en la NOM-021 [16]. Estos valores concuerdan con los reportados por García-Rocha [22], Juárez-Santillán [23] y Lucho-Constantino [24].

La CIC es importante desde el punto de vista de fertilidad, debido a que esta les permite a los suelos poder almacenar cationes necesarios para la nutrición de las plantas. Al mismo tiempo, los suelos con altas CIC, pueden retener cationes metálicos e intercambiarlos con la solución del suelo, de donde pueden ser absorbidos por las plantas.

### Materia Orgánica

Los porcentajes de MO (0.38-4.84%) para este suelo se clasifican de bajos a altos con base en la NOM-SEMARNAT-021, el contenido de MO en el suelo disminuye conforme incrementa la profundidad. En este sentido el agua residual con la que es regado este suelo, resulta una buena fuente de MO [25].

### Textura

Por los valores de arena, limo y arcilla este suelo es clasificado como franco con base en la clasificación de Boulding, [18] y la NOM-021, [16], concuerda con lo reportado por García-Rocha, [22] y Lucho-Constantino [24].

En el suelo estudiado se observó una tendencia a incrementar el contenido de arcilla conforme incrementa la profundidad del suelo, lo que indica que no sólo se están lixiviando nutrientes sino también este mineral, lo cual representa una pérdida de estructura en la capa arable, ya que las arcillas son las partículas de importancia para la retención de nutrientes y humedad.

## Fósforo

Las concentraciones de  $P-PO_4^{3-}$  en el suelo varían entre 21.53 a 270.32  $mg \cdot kg^{-1}$ , estos valores se clasifican como altos, lo cual es benéfico para la nutrición de las plantas, ya que el P es de los macronutrientes primarios. Es muy probable que los contenidos de Al, Ca y Fe sean bajos o en todo caso no estén disponibles, debido al elevado contenido de P y al pH alcalino [20].

El contenido de P encontrado (27.19-164.11  $mg \cdot kg^{-1}$ ) a la profundidad de 60-90 cm es alto, por lo que este nutriente puede llegar a manto freático. Los valores concuerdan con lo reportado por Souza [26] y Musazura [27], ya que mencionan que la lixiviación se puede dar por la desorción del P de los coloides del suelo, además de la competencia de este elemento con el citrato por los sitios de sorción.

## Nitrógeno en el suelo

El nitrógeno del suelo se encuentra en la materia orgánica, fijado de modo estable en la red de los silicatos, como ion  $NH_4^+$  y  $NO_3^-$ . El N asimilado por las plantas es, principalmente el inorgánico como  $NO_3^-$  [17]. En este estudio las concentraciones tanto de  $NO_3^-$  y  $NH_4^+$  encontrados en el suelo fueron superiores a los reportados por Juárez-Santillán [23] y García-Rocha [22].

Las altas concentraciones encontradas de  $NH_4^+$  en el segundo y cuarto muestreo (Tabla 2) a profundidades superiores de 30 cm, es porque este pudo haber sido desplazado de los sitios de intercambio de la capa superior del suelo por los cationes de mayor carga ( $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ ), porque tienen mayor preferencia a ser adsorbidos en la red de intercambio, no obstante las concentraciones encontradas de 0-30 y de 30-60 son altas, debido a la entrada constante de nitrógeno por el agua y por la fijación del mismo, así como, por la retención en la red de intercambio; Musazura [10], realizaron una dinámica del N y P en suelos fertilizados y regados con efluente tratado, encontrando resultados similares de estos nutrientes, siendo la profundidad de 0-30 y de 60-90 cm la de mayor concentración; comportamiento similar encontraron Musazura [27], en la profundidad de 0-30, argumentando que podría atribuirse a la baja conductividad hidráulica del suelo permitiendo que los nutrientes se acumulen en las capas superiores, no obstante en este estudio hay presencia notoria de N en la profundidad superior de 30 cm.

El contenido de  $NO_3^-$  y  $NH_4^+$  en la profundidad de 60-90 cm en algunos casos son mayores, resultados cohe-

rentes con los reportados por De Notaris [28], informaron que la lixiviación de N aumentó con el incremento del excedente adicionado, ya sea por fertilizantes u otra fuente; además, que en regiones con clima frío y húmedo, las pérdidas de N vía desnitrificación es restringida por la baja actividad microbiana del suelo, drenado alto y elevada precipitación, mencionan que el excedente de N puede conducir a pérdidas por lixiviación. Esta lixiviación, puede ser explicada debido a que los  $NO_3^-$  no son retenidos en las posiciones de intercambio iónico del suelo, ya que tiene carga negativa.

Tabla 1 Concentración de  $NO_3^-$  y  $NH_4^+$

Profundidad	$NO_3^-$	$NH_4^+$
	$mg \cdot kg^{-1}$	
<b>30-1</b>	28.37±0.77	37.54±0.65
<b>30-2</b>	53.74±2.65	147.45±1.70
<b>30-3</b>	9.28±0.21	4.58±0.15
<b>30-4</b>	44.24±1.51	126.33±1.90
<b>30-5</b>	25.03±2.27	145.60±1.04
<b>60-1</b>	22.74±0.17	6.74±0.08
<b>60-2</b>	44.43±4.10	124.55±0.90
<b>60-3</b>	28.32±1.86	126.78±3.25
<b>60-4</b>	11.44±1.31	27.31±1.59
<b>60-5</b>	54.07±3.21	159.08±9.07
<b>90-1</b>	48.30±1.26	184.12±2.78
<b>90-2</b>	15.47±0.15	23.79±2.07
<b>90-3</b>	53.30±1.86	169.32±4.53
<b>90-4</b>	14.65±0.14	9.08±0.35
<b>90-5</b>	41.35±0.16	123.57±0.78

30, 60, 90 cm = profundidad del suelo; 1, 2, 3, 4 y 5 = número de muestreo

## Análisis de ANOVA

En la primera etapa de La ANOVA se comprueba si hay significancia con las medias. Para este estudio el nivel de significación ( $p$ ) empleado fue de 0.05( $\alpha$ ). Si no hay significancia, un análisis posterior es innecesario. De acuerdo con González [29], se procede a reportar la no significancia e indicar que no hay evidencia para concluir que los tratamientos ensayados provocan diferencia en el promedio observado para la variable de interés. Para poder interpretar mejor los resultados se basa en lo siguiente [29]:

Si  $p \leq \alpha$ : Las diferencias entre alguna de las medias son estadísticamente significativas; se puede concluir que no todas las medias de población son iguales.

Valor  $p > \alpha$ : Las diferencias entre las medias no son estadísticamente significativas; se puede concluir que las medias de población no varían.

Los valores  $p$  (tabla 3), indican que las medias de las variables fisicoquímicas sí difieren significativamente,

debió a que  $p$  es menor a  $\alpha$  (0.05). Los valores más pequeños de  $p$  ( $p = 1.51E-38$ ) los presenta la concentración de  $\text{NH}_4^+$ , lo que indica que las medias de este parámetro presentan mayores diferencias significativas entre los muestreos y profundidades de suelo.

Tabla 2. Valores de  $p$

Variable	$p$
pH	1.82E-09
CIC	4.42E-06
CE	2.76E-21
$\text{Cl}^-$	2.67E-28
$\text{SO}_4^{2-}$	1.68E-30
$\text{P-PO}_4^{3-}$	5.39E-24
MO	1.28E-18
Arcilla	2.78E-08
Limo	3.83E-06
Arena	8.37E-08
$\text{NO}_3^-$	1.72E-26
$\text{NH}_4^+$	1.51E-38

$F$  = Estadístico de contraste,

$p$  = Valor de significación,

$\text{Cl}^-$  = Cloruros,

$\text{NH}_4^+$  = Sulfatos,

$P$  = Fósforo,

CIC = Capacidad de intercambio catiónico,

CEs = Conductividad eléctrica en el extracto de saturación,

MO = Materia orgánica

### Prueba de Tukey

La prueba de Tukey permite hacer todas las comparaciones de tratamientos de dos en dos, y por eso se considera de la más completa; hace agrupaciones de medias que no difieren significativamente y las separa de las que sí [29].

En la Tabla 4 (Anexo 2), se observan los grupos que se formaron en cada columna, a mayor número de letras con base en orden alfabético, más grupos y por lo tanto más diferencias significativas. Se observa que las medias que presentan mayor similitud y en las que se puede decir que no hay tanta diferencia significativa es la arena y limo; seguidos de CIC, arcilla y CE, las variables restantes presentan mayor diferencia significativa. Se observa que el  $\text{NH}_4^+$ , fue el que presentó la mayor diferencia significativa de sus medias a lo largo de la profundidad y el muestreo; las variables que también presentaron diferencia significativa marcada están pH,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , P y MO; Las restantes se agrupan con letras similares. La mayoría de los valores más altos de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , P y MO están en la profundidad de 30-60 cm; en cuanto a pH, CIC, limo y arena, se encuentran en la profundidad de 0-30 cm; finalmente en cuanto a arcilla,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ , los datos más elevados están en la profundidad de 60-90 cm.

De forma general podemos denotar una pérdida de suelo en la capa arable, con alcalinización de la misma; además de poder observar un lavado de sales y una lixiviación importante de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ , los cuales pueden llegar a mato freático, lo que podría generar cierta eutrofización en este compartimento ambiental.

### Correlación de Pearson

La correlación lineal es un caso particular en el que tal correspondencia tiene características bien definidas y que suele medirse mediante el coeficiente R de Pearson [30 y 31]. Las principales correlaciones con nivel de 0.01 y 0.05 de significancia se presentan en la tabla 5 (Anexo 3). El pH presenta correlaciones negativas con  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , puede explicarse porque el ion hidronio, puede quedar retenido por las arcillas y la materia orgánica, mientras que los iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , quedan expuestos para ser lixiviados. La CIC presenta una correlación negativa con los  $\text{SO}_4^{2-}$  y positiva con la MO, la primera es explicada porque la CIC es para cationes, mientras que la presencia de MO favorece la CIC. La correlación positiva entre CE y  $\text{Cl}^-$ , se debe a la relación directa que tienen estos dos parámetros.

La correlación de los  $\text{Cl}^-$  con  $\text{SO}_4^{2-}$  y limo, se debe a que tanto el  $\text{Cl}^-$  como el  $\text{SO}_4^{2-}$ , pueden tener comportamiento similar por la presencia de cargas negativas. Las correlaciones negativas que presenta el  $\text{SO}_4^{2-}$  con la MO y la arcillas, es por las fuerzas electrostáticas repulsivas que existen entre ellas; la correlación positiva que presenta el P con la MO, se debe a que al momento de ser degradada la MO, puede liberarlo; mientras que la correlación negativa entre el P y el  $\text{NO}_3^-$ , se explica por las repulsiones electrostáticas entre ellos, además que el P precipitado fácilmente. La correlación negativa que presentan la MO y Limo, es porque en el limo la MO tiene un ritmo elevado de descomposición. Las correlaciones negativas entre el limo, arcilla y arena, se explican, ya que son partículas que están en constante cambio por su naturaleza estructural con la formación del suelo; la correlación positiva que presenta el  $\text{NH}_4^+$  con el  $\text{NO}_3^-$ , es explicado por el proceso de nitrificación, conforme incrementa la concentración de  $\text{NH}_4^+$  favorece al incremento de la concentración de  $\text{NO}_3^-$ , por dicho proceso.

### CONCLUSIONES

Las concentraciones de N en forma de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$  encontradas en la profundidad de 60-90 cm son importantes, por lo que representan un riesgo de contaminación si llegan a manto freático.

Los diferentes análisis estadísticos, permiten observar una degradación de la capa arable, lo que ha propiciado que exista lixiviación de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ .

Los resultados indican que la capa arable está sufriendo un deterioro, por lo que se recomienda hacer uso de fertilizantes orgánicos, los cuales favorezcan la re-

generación de dicha capa, esto permitirá ir mitigando problemas de salinidad. Se recomienda hacer un plan de riego, para esto es importantes no hacerlo por inundación como se hace actualmente.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. J. V. Tamariz, "Contaminación de suelos agrícolas por metales pesados en el municipio de Atlixco, Puebla". Tesis de Maestría en Edafología. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 1996.
- [2] G., T. Méndez, A. R. Flores y S. Palacios, "Disponibilidad de Cd, Fe, Mn y Pb en suelos agrícolas de Tecamachalco, Estado de Puebla". En: Memorias del XXVII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Villahermosa, Tabasco. 1997.
- [3] D. Baldock, H. Caraveli, J. Dwyer, S. Einschutz, J. E. Petersen, J. Sumpsi-Vinas y C. Varela-Ortega, "The Environmental Impacts of Irrigation in the European Union". Institute for European Environmental Policy: London, UK. 2000.
- [4] E. O. Oriola, "Effects of irrigation on soils of a sub-humid part of Kwara state, Nigeria". Centrepoint (Science Edition), vol. 12, pp. 52-62. 2003.
- [5] P. Schjonning, S. Elmholt y B. T. Christensen. "Managing Soil Quality: Challenges in Modern Agriculture". Soil Quality Management -Concepts and Terms. CABI: Wallingford, UK and Cambridge, USA. 2004.
- [6] Yu. N. Nikolskii, I. P. Aidarov, C. Landeros-Sánchez y V. V. Pcholkina, "Impact of long-term freshwater irrigation on soil fertility". Irrig. and Drain. pp. 1-9. 2019.
- [7] M. A. Mojid, A. B. M. z. Hossain, y G. C. L. Wyseure, "Impacts of Municipal Wastewater on Basic Soil Properties as Evaluated by Soil Column Leaching Experiment in Laboratory". Journal of Soil Science and Plant Nutrition, vol. 19, pp. 402-412. 2019.
- [8] I. B. Bame, J. C. Hughes, L. W. Titshall, y C. A. Buckley, "The effect of irrigation with anaerobic baffled reactor effluent on nutrient availability, soil properties and maize growth". Agriculture Water Management, vol. 134, pp. 50-59. 2014.
- [9] Z. M. Ogbazghi, E. H. Tesfamariam, y J. G. Anandale, "Modelling N mineralization from sludge-amended soils across agro-ecological zones: A case study from South Africa". Ecol. Modell. vol. 322, pp. 19-30. 2016.
- [10] W. Musazura, A. O. Odindo, E. H. Tesfamariam, J. C. Hughes y C. A. Buckley, Nitrogen and phosphorus dynamics in plants and soil fertigated with decentralised wastewater treatment effluent Agricultural Water Management, vol. 215, pp. 55-62. 2019.
- [11] L. E. Lesser, A. Mora, C. Moreau, J. Mahlknecht, A. Hernández-Antonio, Al. Ramírez y H. Barrios-Pina, "Survey of 218 organic contaminants in groundwater derived from the world's largest untreated wastewater irrigation system: Mezquital Valley, Mexico". Chemosphere, vol. 198, pp. 510-521. 2018.
- [12] F. M. C. Oviedo, M. L. Herrera, R. B. Hernández, O. A. A. Sandoval, C. A. Lucho-Constantino, M. I. R. Santamaría, "Degradación del suelo en el Distrito de riego 003 Tula, Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Soil degradation in the irrigation District 003 Tula, Valle del Mezquital, Hidalgo, Mexico". UDO Agrícola, vol. 12. 2018.
- [13] R. Pérez, R. Jiménez, B. E. Jiménez y A. Chávez, "El agua del valle del Mezquital, fuente de abastecimiento para el Valle de México". Documento de trabajo. [Intenet] Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/saneab/mexicon>. 2009.
- [14] L. E. Lesser-Carrillo, J. M. Lesser-Illades, S. Arellano-Islas y D. González-Posadas, "Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del Valle del Mezquital, México central". Revista Mexicana Ciencias Geológicas, vol. 28, pp.323-336. 2011.
- [15] E. M. Otazo-Sánchez, A. E. Navarro-Frómata y V. P. Sing, "Water Availability and Management in Mexico". Springer. College Station, TX, USA, pp. 215-231. 2020.
- [16] Diario Oficial de la Federación, "Norma Oficial Mexicana: NOM-SEMARNAT-021-2000 Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreos y análisis. México". 2000.
- [17] P. E. Yúfera y D. J. M. Carrasco, "Química Agrícola". Primera edición. Ed. Alambra, Barcelona España. 1973.
- [18] S. R. Bolulding, "Description and Sampling of contaminated Soils a field guide". 2nd. Ed. Lewis Publishers. Boca Raton, FA, USA, p. 229. 1994.
- [19] Flores, L., Blas, G., Hernández, G. y Alcalá, R., 1997. Distribution and sequential extraction of some heavy metals from soils irrigated with wastewater from Mexico City. Springer Netherlands. 98: 105-117.
- [20] C. M. Seoáñez, A. A. J. Chacón, De O. A. Gutiérrez y A. I. Angulo, "Contaminación del suelo". Estu-

dios, tratamiento y gestión. Editorial Mundi-Prensa. Madrid. Vol. 29, pp. 169-170. 1999.

[21] C. J. Porta, L. A. M. Reguerin, De la B. C. Roquero, "Edafología para la agricultura y el medio ambiente". Ediciones Mundi-prensa. Madrid.España. 1994.

[22] J. García-Rocha, "Correlación de propiedades fisicoquímicas y metales selectos en suelos agrícolas de la región Mixquiahuala-Progreso-Tepatepec del Distrito de Riego 03, irrigados con aguas negras". Tesis de licenciatura. Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca, Hidalgo. 2004.

[23] L. F. Juárez-Santillán, "Efecto de la fertilización nitrogenada y aprovechamiento de fósforo y potasio en suelos de Tlaxcoapan y Vicente Guerrero, Hidalgo para el cultivo de cebada". Tesis de licenciatura. Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca, Hidalgo. 2005.

[24] C. A. Lucho-Constantino, M. Álvarez, R. I. Beltrán-Hernández, F. Prieto, y H. M. Poggi-Varaldo, "A multivariate analysis of the the accumulation and fractionation of major and trace elements in agricultural soils Hidalgo State, Mexico irrigated with raw wastewater". *Environment International*, vol. 31, pp 313-323. 2004.

[25] A. Kumar y S. Sharma, "Microbes and Enzymes in Soil Health and Bioremediation". In *Microorganisms for Sustainability*. Springer, vol. 16. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-9117-0>. 2020.

[26] M. F. Souza, E. M. B. Soares, I. R. Silva, R. F. Novais y M. F. O. Silva, "Competitive sorption and desorption of phosphate and citrate in clayey and sandy loam soils". *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol 38, pp. 1153-1161. 2014.

[27] W. Musazura, A. Odindo, I. Bame y E. Tesfariam, "Effect of irrigation with anaerobic baffled reactor effluent on Swiss chard (*Beta vulgaris* cicla.) yield, nutrient uptake and leaching". *Journal Water Reuse Desalin*, vol. 5, pp. 592-609. 2015.

[28] C. De Notaris, J. Rasmussen, P. Sørensen y J. E. Olesen, "Nitrogen leaching: a crop rotation perspective on the effect of N surplus, field management and use of catch crops". *Agriculture Ecosystems Environment*, vol. 255, pp. 1-11. 2018.

[29] M. I. González, "Potencia de prueba: la gran ausente en muchos trabajos científicos". *Agronomía Mesoamericana*, vol. 19 no. 2, pp.309-313. 2008.

[30] D. C. Montgomery, "Diseño y análisis de experimentos". Limusa Wiley, México D.F. p. 686. 2003.

[31] J. D. Hernández-Lalinde, J. F. Espinosa-Castro, M. E. Peñaloza-Tarazona, J. E. Rodríguez, J. G. Chacón-Rangel, C. A. Toloza-Sierra, M. K. Arenas-Torradó, S. M. Carrillo-Sierra y V. J. Bermúdez-Pirela, "Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones". *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, pp. 587-595. 2018.

ANEXO 1. Características fisicoquímicas del suelo

Profundidad (cm)	pH	CIC (Cmol (+)*kg <sup>-1</sup> )	CE (dS *m <sup>-1</sup> )	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	MO	Arcilla	Limo	Arena
				mg*kg <sup>-1</sup>			%			
30-1	8.25 ±0.36	37.34 ±0.71	1.44 ±0.10	130.58 ±2.37	5.09 ±0.42	64.18 ±4.80	2.61 ±0.31	24.33 ±1.53	36.00 ±1.73	39.67 ±2.08
30-2	7.20 ±0.05	34.42 ±3.44	1.37 ±0.02	156.54 ±4.25	10.67 ±0.24	61.53 ±7.15	2.07 ±0.05	24.00 ±1.00	35.00 ±1.00	41.00 ±1.73
30-3	8.26 ±0.16	43.31 ±4.02	1.17 ±0.08	144.21 ±1.54	3.69 ±0.43	130.82 ±1.60	3.60 ±0.19	25.00 ±1.00	34.67 ±1.53	40.33 ±2.08
30-4	8.69 ±0.22	35.12 ±1.75	0.66 ±0.05	96.99 ±2.03	2.34 ±0.20	64.79 ±1.07	1.78 ±0.19	22.00 ±1.00	35.67 ±0.58	42.33 ±1.15
30-5	7.67 ±0.18	37.93 ±0.38	0.84 ±0.02	101.91 ±4.09	7.67 ±0.15	135.30 ±0.45	2.25 ±0.05	21.33 ±0.58	37.00 ±1.00	41.67 ±1.15
60-1	8.36 ±0.09	41.76 ±2.34	1.06 ±0.13	120.64 ±8.47	2.68 ±0.22	44.73 ±1.49	1.60 ±0.20	25.67 ±1.53	36.00 ±1.00	38.33 ±2.52
60-2	7.72 ±0.19	35.40 ±1.91	0.67 ±0.01	140.20 ±2.06	9.86 ±0.50	70.99 ±9.18	0.98 ±0.07	19.33 ±0.58	40.00 ±1.00	40.67 ±1.15
60-3	8.16 ±0.27	45.95 ±2.09	0.77 ±0.02	135.63 ±2.52	4.51 ±0.14	73.02 ±1.58	2.70 ±0.05	22.33 ±1.53	34.33 ±1.15	43.33 ±0.58
60-4	8.48 ±0.21	34.77 ±1.10	0.78 ±0.02	61.68 ±0.85	3.34 ±0.13	75.31 ±4.14	2.57 ±0.04	22.67 ±1.53	35.00 ±1.73	42.33 ±3.06
60-5	8.14 ±0.11	35.91 ±0.55	0.67 ±0.02	53.35 ±0.64	4.41 ±0.07	63.79 ±2.25	2.46 ±0.10	21.67 ±1.15	32.67 ±1.15	45.33 ±0.58
90-1	8.18 ±0.04	43.17 ±1.92	1.55 ±0.04	100.16 ±1.83	2.18 ±0.11	52.64 ±1.39	1.46 ±0.21	26.67 ±1.53	34.33 ±0.58	39.00 ±2.00
90-2	7.78 ±0.05	31.26 ±1.15	0.77 ±0.02	122.93 ±1.60	10.04 ±0.38	64.77 ±1.53	1.08 ±0.10	23.67 ±1.53	37.33 ±3.06	39.00 ±1.73
90-3	8.14 ±0.34	46.58 ±2.00	0.77 ±0.01	117.20 ±1.67	1.44 ±0.01	76.97 ±0.77	2.78 ±0.18	27.00 ±1.00	35.00 ±1.00	38.67 ±1.15
90-4	8.75 ±0.07	29.22 ±1.58	0.81 ±0.02	98.16 ±0.53	3.26 ±0.11	69.45 ±2.13	2.06 ±0.08	31.67 ±3.51	36.00 ±2.65	32.33 ±2.52
90-5	7.90 ±0.02	35.92 ±0.68	0.81 ±0.01	65.36 ±2.44	3.82 ±0.03	46.42 ±0.98	2.05 ±0.05	29.33 ±3.21	29.33 ±1.15	46.00 ±1.00

30, 60, y 90=profundidad en cm; 1, 2, 3, 4, y 5=Número de muestreo, Cl<sup>-</sup>=Cloruros, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>=Sulfatos, P=Fósforo, CIC=Capacidad de intercambio catiónico, CE=Conductividad eléctrica en el extracto de saturación, MO=Materia orgánica.

ANEXO 2. Resultados de la prueba de Tukey

Profundidad (cm)	pH	CIC	CE <sub>s</sub>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	P	MO	Arcilla	Limo	Arena	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>4</sub> <sup>+</sup>
30-1	cdef*	abcd	de	ef	g	cd	fg	abcde	bcd	b	d	b
30-2	a	ab	d	h	j	bc	de	abcd	bc	bcd	g	d
30-3	cdef	bcd	c	f	de	G	h	bcde	bc	bc	a	a
30-4	ef	ab	a	c	b	cde	cd	abcd	bcd	bcd	ef	c
30-5	ab	abcd	b	c	h	g	ef	ab	bcd	bcd	cd	d
60-1	def	bcd	c	d	bc	a	c	bcde	bcd	b	c	a
60-2	abc	ab	a	f	i	cdef	a	a	d	bcd	ef	c
60-3	bcde	cd	ab	fg	fg	def	g	abcd	bc	bd	d	c
60-4	ef	ab	ab	ab	cd	ef	fg	abcd	bc	bcd	ab	b
60-5	bcde	abc	a	a	efg	cd	efg	abc	ab	cd	g	e
90-1	bcdef	bcd	e	c	ab	ab	bc	cdef	bc	b	f	g
90-2	bc	a	ab	de	ij	cde	ab	abcd	cd	b	b	b
90-3	bcde	d	ab	d	a	f	g	def	bc	b	g	f
90-4	f	a	ab	c	cd	cdef	de	f	bcd	a	b	a
90-5	bcd	abc	ab	b	def	a	de	ef	a	d	e	c

a, b y c=letras diferentes en una misma columna indican diferencia significativa entre un muestreo y otros, \*=las letras en negro indican que ahí se presentaron los valores más altos de la variable

ANEXO 3. Correlación de Pearson

	pH	CIC	CE	Cl	SO	P	MO	Arcilla	Limo	Arena	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
pH	1.00											
CIC	0.12	1.00										
CE	-0.16	0.19	1.00									
Cl	<b>-0.35*</b>	0.24	<b>0.40**</b>	1.00								
SO	<b>-0.75**</b>	<b>-0.39**</b>	-0.01	<b>0.45**</b>	1.00							
P	-0.09	0.18	-0.08	0.20	0.13	1.00						
MO	0.22	<b>0.40**</b>	0.10	-0.01	<b>-0.40**</b>	<b>0.52**</b>	1.00					
Arcilla	0.27	-0.03	0.22	-0.15	<b>-0.43**</b>	-0.25	0.10	1.00				
Limo	-0.03	-0.05	-0.07	<b>0.46**</b>	<b>0.42**</b>	0.22	<b>-0.33*</b>	<b>-0.39**</b>	1.00			
Arena	-0.28	0.07	-0.20	<b>-0.31*</b>	0.06	-0.01	0.14	<b>-0.49**</b>	<b>-0.52**</b>			
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>-0.34*</b>	0.16	0.04	-0.06	0.03	<b>-0.39**</b>	-0.21	-0.12	-0.20	<b>0.32*</b>	1.00	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<b>-0.38**</b>	0.26	-0.04	-0.13	0.04	-0.09	-0.12	-0.22	-0.20	<b>0.41**</b>	<b>0.86**</b>	1.00

\*La correlación es significativa en el nivel 0.05(bilateral).

\*\*La correlación es significativa en el nivel 0.01(bilateral).