



DOI: 10.29298/rmcf.v15i85.1467

Artículo de investigación

## Indicadores de calidad para suelos forestales dentro de un Área Natural Protegida

### Quality indicators for forest soils within a Protected Natural Area

Elizabeth García-Gallegos<sup>1</sup>, Elizabeth Hernández-Acosta<sup>2\*</sup>

Fecha de recepción/Reception date: 16 de febrero de 2024.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 21 de junio de 2024.

<sup>1</sup>Laboratorio de Recursos Naturales, Centro de Investigación en Genética y Ambiente, Universidad Autónoma de Tlaxcala. México.

<sup>2</sup>Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. México.

\*Autor para correspondencia; correo-e: ehernandez@chapingo.mx

\*Corresponding autor; e-mail: ehernandez@chapingo.mx

#### Resumen

El suelo forestal proporciona diferentes servicios ecosistémicos, pero que no escapan del fenómeno de la degradación, situación que repercute en la estructura de los bosques. Esto ha sido particularmente notable en el Parque Nacional La Malinche, área natural protegida de Tlaxcala, México, la cual tiene grandes superficies con diferentes condiciones de perturbación. El objetivo del presente estudio fue determinar las propiedades físicas y químicas de suelos forestales para obtener indicadores de calidad por medio de un Análisis de Componentes Principales (ACP). Se seleccionaron dos sitios (San Francisco Tetlanohcan y Teolocholco) y en cada sitio se establecieron cinco puntos, con diferente condición de perturbación y vegetación. Los resultados muestran un mayor porcentaje de arena en todos los suelos ( $> 70\%$ ) que de arcilla y limo; densidad aparente  $> 1 \text{ g cm}^{-3}$ , contenido de materia orgánica bajo en todos los suelos y una variabilidad respecto a la parte nutrimental; a excepción del contenido de fósforo, que fue alto en todos los sitios, lo que posiblemente depende del tipo de vegetación y de la condición propia de cada uno de los puntos de muestreo. El Análisis de Componentes Principales evidenció que la densidad aparente, porosidad, humedad aprovechable, pH, capacidad de intercambio catiónico y las concentraciones de Mn, Na, Cu, B, Ca y K pueden emplearse para determinar la calidad física y química de los suelos forestales, lo cual apoyaría el diseño de estrategias de rehabilitación encaminadas a detener la degradación de los suelos dentro del área natural protegida.

**Palabras clave:** Calidad del suelo, degradación del suelo, propiedades edáficas, recurso suelo, Tlaxcala, volcán La Malinche.

#### Abstract

The forest soil provides various ecosystem services; however, it does not escape the phenomenon of degradation, a situation that has repercussions on the structure of the forests. This has been particularly noticeable in the *La Malinche* National Park, a natural protected area in *Tlaxcala*, Mexico, which has large areas with a variety of disturbance conditions. The objective of this study was to determine the physical and chemical properties of forest soils to obtain quality indicators by means of a Principal Component Analysis (PCA). Two sites were selected (*San Francisco Tetlanohcan* and *Teolocholco*), and five points exhibited different disturbance

and vegetation in each site. The results show a higher percentage of sand in all soils (>70 %) than of clay and silt; bulk density  $>1 \text{ g cm}^{-3}$ , low organic matter content in all soils, and variability concerning nutrient content, except for phosphorus content, which was high at all sites, possibly depending on the type of vegetation and the condition at each of the sampling points. The Principal Component Analysis showed that bulk density, porosity, usable moisture, pH, cation exchange capacity, and concentrations of Mn, Na, Cu, B, Ca and K can be used to determine the physical and chemical quality of forest soils, which would support the design of rehabilitation strategies aimed at halting soil degradation within the protected natural area.

**Key words:** Soil quality, soil degradation, soil properties, soil resource, *Tlaxcala*, *La Malinche* volcano.

## Introducción

El suelo es un componente importante de los ecosistemas forestales, donde se llevan a cabo diversas funciones tales como la descomposición de la materia orgánica, el ciclado de nutrientes, disponibilidad de agua, además de proporcionar anclaje a los árboles y a otro tipo de vegetación (Corti *et al.*, 2020); pero las perturbaciones, el cambio de uso y su sobreexplotación pueden contribuir a la degradación de este recurso, lo que afecta negativamente la estructura, tamaño o función de los bosques, además de reducir su capacidad para proveer bienes y servicios ambientales (Blum, 2020).

En México, la degradación del suelo es un problema grave que se acentúa en las zonas montañosas; particularmente, en el estado de Tlaxcala se reconoce que 92.9 % de su superficie presenta erosión hídrica (Bolaños *et al.*, 2016), problema que se observa en el Parque Nacional La Malinche (área natural protegida) en donde se ha propiciado la pérdida de suelo y la vegetación de sus bosques, lo que deriva en un incremento de la temperatura y cambios en los patrones de precipitación que han favorecido un aumento de las poblaciones del escarabajo descortezador, insecto que ha eliminado una población importante de árboles (López, 2023); lo cual, aunado a la apertura de tierras para la agricultura, la ganadería, los asentamientos humanos, la deforestación, la producción de carbón mineral y los incendios, ha ocasionado una importante degradación del suelo (Blum, 2020).

Por lo anterior, es importante tener un diagnóstico y evaluación a partir del estudio de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo para entender cómo influyen en el crecimiento de la cobertura vegetal y como las han impactado las diferentes actividades antrópicas (Álvarez-Arteaga *et al.*, 2020). La caracterización de los suelos debe ser particular para cada región, debido a las condiciones edafoclimáticas, ya que varían de un lugar a otro; además de considerar el uso del suelo, esto permitirá contribuir a una gestión integral del recurso (Trujillo-González *et al.*, 2018).

En este contexto, el objetivo del presente estudio consistió en determinar las propiedades físicas y químicas de suelos forestales con diferente condición de perturbación dentro del Parque Nacional La Malinche, y a través de un Análisis de Componentes Principales (ACP) obtener indicadores de calidad para la implementación de estrategias de conservación de este recurso natural, mediante el monitoreo de los cambios en su calidad.

## **Material y Métodos**

### **Área de estudio**

El área de estudio se ubica al Suroeste del Parque Nacional La Malinche en el estado de Tlaxcala, México. Se seleccionaron en época de estiaje dos sitios: Teolocholco (TL) y San Francisco Tetlanohcan (SFT) y en cada uno de ellos se establecieron cinco puntos, rodeados de ambientes perturbados por erosión, deforestación, incendios y cambio de uso del suelo (Cuadro 1) y a una distancia entre puntos de 500 m; además, se incluyeron sitios conservados.

**Cuadro 1.** Localización y condición de cada punto de muestreo en los sitios del Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala, México.

Punto	Latitud	Longitud	Altura (msnm)	Vegetación dominante	Condición
San Francisco Tetlanohcan					
1	19°14'19.26"	98°04'18.38"	3 242	<i>Pinus</i> sp., <i>Alnus</i> sp., herbáceas	Conservado
2	19°14'22.97"	98°04'34.32"	3 189	<i>Pinus</i> sp., <i>Alnus</i> sp., herbáceas	Conservado
3	19°14'29.79"	98°04'51.42"	3 121	<i>Pinus</i> sp., helechos, herbáceas	Deforestación, erosión
4	19°14'36.02"	98°05'08.43"	3 031	<i>Pinus</i> sp., <i>Quercus</i> sp., herbáceas	Incendio, deforestación, erosión
5	19°14'40.61"	98°05'39.27"	2 925	<i>Pinus</i> sp., <i>Quercus</i> sp., herbáceas	Incendio, deforestación, erosión
Teolochoholco					
1	19°14'06.95"	98°05'05.29"	3 117	<i>Pinus</i> sp., helechos, herbáceas	Conservado
2	19°14'07.05"	98°05'15.77"	3 060	<i>Pinus</i> sp., helechos, herbáceas	Conservado
3	19°14'03.93"	98°05'31.25"	3 004	<i>Pinus</i> sp., herbáceas	Deforestación, erosión
4	19°14'06.33"	98°05'51.41"	2 920	<i>Pinus</i> sp., <i>Quercus</i> sp., herbáceas	Incendio, deforestación, erosión
5	19°14'13.12"	98°06'08.58"	2 890	<i>Zea mays</i> L., <i>Phaseolus vulgaris</i> L., herbáceas	Cambio de uso de suelo

El clima en la zona es templado subhúmedo y la vegetación es la característica de un bosque templado. Las lluvias ocurren de mayo a septiembre; la temperatura mínima promedio anual varía de 6.4 a 6.9 °C y la máxima de 22.7 a 24.3 °C; el intervalo de la precipitación promedio es de 100 a 165 mm; y el suelo predominante

corresponde al orden Regosol (suelos jóvenes, que se desarrollan sobre material no consolidado) con una presencia en TL de 74 % y en SFT de 43 % (INEGI, 2010a, b).

## **Muestreo de suelo y preparación de las muestras**

En cada punto de muestreo se trazó un cuadrante de 400 m<sup>2</sup> en donde se recolectaron tres muestras simples a una profundidad de 0-30 cm, para ello se siguió una trayectoria en zig-zag a partir de eliminar el efecto orilla. Posteriormente, cada una de las muestras se secó sobre papel *Kraft* a temperatura ambiente y a la sombra para luego tamizar en malla de 2 mm y obtener un tamaño de partícula homogéneo, lo anterior con base en la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002).

## **Análisis de suelo**

En cada muestra se determinó la clase textural, una vez obtenido el porcentaje de las partículas de arena, limo y arcilla por el método del hidrómetro de *Bouyoucos*; la capacidad de campo (*CC*) y el punto de marchitez permanente (*PMP*) evaluados por el método de la olla y membrana de presión; la porosidad y humedad aprovechable (*HA*) de acuerdo con Rodríguez y Rodríguez (2011); la densidad aparente (*DA*) por el método de la probeta como se indica en la NMX-FF-109-SCFI-2007 (SE, 2008). El pH en una relación suelo:agua 1:2 (p/v); la materia orgánica (*MO*) por el método de *Walkley y Black*; la conductividad eléctrica (*CE*) en una suspensión suelo:agua (1:5 p/v); la capacidad de intercambio catiónico (*CIC*) y K, Ca, Mg y Na por acetato de amonio 1 N pH 7; N total por el método semimicro-*Kjeldahl*; P disponible por *Bray y Kurtz 1* modificado; los micronutrientes (Cu, Fe, Mn, Zn) por la solución complejante DTPA; y B por el método de azometina-H (NOM-021-RECNAT-2000) (Semarnat, 2002).

## Análisis de los datos

Para el análisis de los datos se utilizó un diseño experimental anidado, con dos factores (los sitios TL y SFT) y como niveles los puntos, cada uno con tres repeticiones. Los datos se sometieron a la prueba de normalidad de *Shapiro-Wilk* y a la de homogeneidad de varianzas de *Levene* ( $p > 0.05$ ). Una vez cumplidos los supuestos de normalidad, se aplicó un análisis de varianza y después una prueba de comparación de medias *Tukey* ( $p < 0.05$ ) para identificar si existen diferencias entre los sitios (TL y SFT) y entre puntos dentro de cada sitio. El modelo estadístico para el diseño experimental empleado se presenta en la Ecuación 1 (InfoStat, 2008).

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + P_{j(i)} + \varepsilon_{(ij)k} \quad (1)$$

Donde:

$Y_{ijk}$  = Variable respuesta

$\mu$  = Media general

$S_i$  = Valor del *i*-ésimo factor sitio

$P_{j(i)}$  = Valor del *j*-ésimo valor del punto dentro del *i*-ésimo sitio

$\varepsilon_{(ij)k}$  = Error aleatorio asociado a la variable respuesta  $Y_{ijk}$

Posteriormente se aplicó un Análisis de Componentes Principales (ACP) para obtener indicadores de calidad del suelo. Todo lo anterior con uso del *software* estadístico *InfoStat*, versión libre 2008 (InfoStat, 2008).

## Resultados y Discusión

Las diferentes propiedades físicas y químicas de los suelos mostraron que el sitio Teolocholco (TL) fue diferente al sitio San Francisco Tetlanohcan (SFT) solo en *CE* ( $p=0.0349$ ), pero aún, sin diferencias, existieron valores mayores en las variables evaluadas en TL. En los puntos dentro de cada sitio, al menos uno de ellos registró valores significativos, excepto en el contenido de B ( $p=0.0676$ ). Estos resultados pueden deberse a que los suelos del Parque Nacional La Malinche se formaron a partir del intemperismo de cenizas volcánicas, por lo que sus características físicas y químicas tienden a ser similares; aunque el tipo de vegetación, así como su condición influyen en sus propiedades edáficas (Vela-Correa *et al.*, 2007).

Respecto a las propiedades físicas, todos los suelos presentaron una mayor proporción de la fracción arena  $>70\%$ , en relación al contenido de arcilla y limo. En el Cuadro 2 se muestran las diferencias significativas de las variables entre puntos por sitio. En el SFT, la *DA* fue significativamente superior en el Punto 2, valores cercanos se registraron en los puntos del sitio TL. La porosidad en todas las muestras fue  $>40\%$ , con un valor significativo en el Punto 4 de SFT.

**Cuadro 2.** Propiedades físicas de los suelos en dos sitios del Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala, México.

Punto	<i>DA</i> (g cm <sup>-3</sup> )	Porosidad	<i>CC</i> (%)	<i>PMP</i>	<i>HA</i>
San Francisco Tetlanohcan					
1	1.51 b	43.0 ab	17.9 g	6.3 f	11.5 g
2	1.55 a	41.0 c	18.5 f	6.6 e	11.8 f
3	1.46 c	44.5 b	20.7 d	7.3 d	13.4 e
4	1.27 d	51.6 a	31.2 a	9.3 a	22.5 a
5	1.51 b	43.0 ab	20.9 d	6.2 f	14.2 c

Teolocholco					
1	1.46 c	43.7 b	18.4 f	7.5 d	10.9 i
2	1.51 b	42.6 ab	21.8 c	8.0 c	13.8 d
3	1.51 b	43.1 b	19.1 e	7.4 d	11.6 fg
4	1.47 c	44.1 b	17.9 g	6.7 e	11.2 h
5	1.47 c	44.4 b	23.5 b	8.4e	15.0 b

Letras diferentes por columna indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). Media de *Tukey*. *DA* = Densidad aparente; *CC* = Capacidad de campo; *PMP* = Punto de marchitez permanente; *HA* = Humedad aprovechable.

En este mismo Punto, la *CC* y el *PMP* que proporcionan la *HA* de los suelos, al momento de recolectar la muestra fue significativa, y disminuyó en el resto de los puntos en los dos sitios estudiados (Cuadro 2).

En suelos con más proporción de arena, los procesos de mineralización se favorecen como resultado de una mayor aireación, pero esto disminuye la *CC* (Huang y Hartemink, 2020). En cuanto al *PMP* aumenta, si existe una cantidad superior de arcilla; pero dado que los suelos bajo estudio son arenosos, el valor de esta variable fue menor en el Punto 5 de SFT, donde existe perturbación por incendios, deforestación y problemas de erosión.

En un sistema agroforestal se citó una *CC* de 36 % (Murray *et al.*, 2014); por otra parte, Meza y Geissert (2003) obtuvieron en suelos forestales del Cofre de Perote, Veracruz, una *CC* de 43 %, un *PMP* de 21 % y una *HA* de 22 %, valores superiores a los estimados en SFT y TL; lo anterior responde a la textura y materia orgánica, aunado a la vegetación presente, su condición y manejo (Cuadro 1).

Los suelos de origen volcánico tienen características físicas que favorecen una buena estabilidad estructural y una importante resistencia a la degradación. Sin embargo, estas son afectadas por las actividades antrópicas, tal es el caso de la *DA*. Los suelos

de SFT y TL tuvieron valores superiores a los que establece la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002) para suelos volcánicos ( $<1 \text{ g cm}^{-3}$ ). En suelos ubicados a una altitud de 2 700 m con *Pinus ayacahuite* C. Ehrenb. ex Schltldl. y a 3 000 m con *P. patula* Schltldl. & Cham. se consignó una *DA* de  $0.8 \text{ g cm}^{-3}$  (Vázquez-Cuecuecha *et al.*, 2015), valor menor a lo determinado en los suelos bajo estudio. En suelos forestales con aprovechamientos de *P. radiata* D. Don, la *DA* fue de  $1.35 \text{ g cm}^{-3}$  (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010). Solo en el Punto 4 del sitio SFT, el incendio provocó una mineralización de los residuos orgánicos, lo que se reflejó en una disminución de la *DA* (Cuadro 2).

El pH fue moderadamente ácido en todos los suelos muestreados, el Punto 1 del sitio TL presentó el valor significativamente más alto (Cuadro 3). El pH se considera adecuado para su condición forestal, lo que se puede deber a la mineralización de la *MO*, la presencia de aluminio y a las acículas de los árboles del género *Pinus* sp., las cuales son potencialmente acidificantes debido a la producción de ácidos orgánicos y  $\text{H}_2\text{CO}_3$  que influyen en la formación de complejos Al-humus (Martínez-Cruz *et al.*, 2002).

**Cuadro 3.** Propiedades químicas: N total, P y K de los suelos muestreados en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala, México.

Punto	pH	<i>MO</i> (%)	<i>CE</i> ( $\text{dS m}^{-1}$ )	<i>CIC</i> ( $\text{Cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ )	N total (%)	P ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	K
San Francisco Tetlanohcan							
1	5.9 b	3.10 c	0.35 fg	14.10 a	0.14 de	37.80 e	5.0 b
2	5.7 bc	2.50 f	0.35 fg	8.10 i	0.12 e	36.56 f	2.9 d
3	5.5 c	3.10 e	0.37 ef	9.02 g	0.15 cd	39.13 b	3.0 d
4	5.5 c	5.20 b	0.34 g	9.03 g	0.25 a	39.43 a	3.8 c
5	5.8 b	1.70 g	0.29 h	12.10 c	0.08 f	35.13 g	4.9 b
Teolocholco							
1	6.2 a	3.20 e	0.90 a	12.86 b	0.17 c	33.70 i	3.9 c
2	5.7 bc	4.30 d	0.39 e	10.13 e	0.21 b	34.60 h	5.9 a

3	5.9 b	4.36 d	0.42 d	9.76 f	0.21 b	38.30 f	3.0 d
4	5.8 b	4.66 c	0.75 b	8.70 h	0.21 b	39.20 d	5.0 b
5	5.9 b	5.66 a	0.51 c	11.33 d	0.27 a	38.70 c	6.0 a

Letras diferentes por columna indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). Media de *Tukey*. *MO* = Materia orgánica; *CE* = Conductividad eléctrica; *CIC* = Capacidad de intercambio catiónico.

Respecto al contenido de *MO*, el Punto 5 del sitio TL tuvo el valor más significativo en relación a los demás puntos; sin embargo, fue bajo (4.1-6.0 %) de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002). Particularmente, los suelos del sitio TL mostraron la tendencia a disminuir el contenido de *MO* a mayor altitud; comportamiento que no se observó en los suelos de SFT, en donde se evidenció una variabilidad en su contenido, la cual probablemente puede atribuirse a la condición de cada uno de los puntos (Cuadro 1).

Bhardwaj *et al.* (2022) refieren que la cantidad de hojarasca que se incorpora al suelo en un bosque de clima templado varía en función de la especie vegetal, lo que genera diversos compuestos orgánicos que determinan la calidad de la *MO* y con ello, la disponibilidad de nutrimentos para las plantas, por lo que la hojarasca es una de las fracciones más dinámicas de la *MO* del suelo forestal (Tapia-Coronado *et al.*, 2022). Jiménez-Heredia *et al.* (2010) registran 5.3 % de *MO* en suelos de bosque secundario con vegetación arbustiva, cantidad similar a la del Punto 5 del sitio TL. El contenido de *MO* depende del tipo de vegetación, uso de suelo y del manejo que se realice, entre otros factores (Rodríguez-Yon *et al.*, 2020).

En los suelos de los dos sitios no hubo problemas de sales, y en cuanto a la *CIC* fue alta y significativa en el Punto 1 de SFT con respecto a los demás puntos, pero con bajo intercambio en todos los suelos (5-15  $\text{Cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$ ) según la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002), debido al bajo porcentaje de *MO* (Cuadro 3) y al

predominio de la fracción arena, por lo que se infiere que en los suelos existe una baja capacidad de intercambio catiónico. De acuerdo con Vela-Correa *et al.* (2007) en los suelos del Parque Nacional La Malinche, la CIC fue baja en los horizontes superficiales (0-20 cm) y disminuyó con la profundidad, lo que coincide con los hallazgos del presente estudio.

La parte nutrimental es importante en los suelos forestales. En los sitios muestreados, la concentración de N total fue significativamente mayor en el Punto 4 de SFT y 5 de TL, en comparación con el resto de los puntos, lo que pudo deberse al efecto del incendio y a la incorporación de enmiendas orgánicas (Cuadro 1). La concentración de P fue alta ( $30 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en todos los suelos (Semarnat, 2002). Zhu *et al.* (2021) refieren que cantidades altas de P se registran bajo vegetación arbórea debido probablemente a la mayor acidez, elevados aportes y descomposición de hojarasca, condiciones que favorecen una mayor actividad microbiana, específicamente, la fúngica responsable de la solubilización del fósforo inorgánico, y también a la mineralización del fósforo orgánico. En suelos con presencia de *Pinus radiata* y *P. halepensis* Mill. se tiene una concentración de P de 62 y 94  $\text{mg kg}^{-1}$ , respectivamente (Zalba y Peinemann, 1987), valores aún más altos a los estimados en este trabajo.

La concentración de K en los puntos 2 y 5 de TL fue baja ( $<150 \text{ mg kg}^{-1}$ ) de acuerdo con Aguilar *et al.* (1987), pero más significativa ( $p < 0.05$ ) (Cuadro 3) respecto a los demás puntos de TL y SFT.

En el Cuadro 4 se presenta el contenido de Ca, el cual fue significativamente mayor y de concentración media ( $5-10 \text{ Cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ ) en el Punto 1 de SFT; mientras que, en el Punto 5 de este sitio, la concentración de Mg fue alta ( $>3 \text{ Cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ ), lo mismo que el Cu, aunque deficiente en todos los suelos ( $<0.2 \text{ mg kg}^{-1}$ ); por otro lado, las concentraciones de Fe y Mn fueron mayormente significativas y adecuadas en el Punto 4 ( $2.5$  a  $4.5 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $>1.0 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente) (Semarnat, 2002).

**Cuadro 4.** Nutrimientos de los suelos muestreados en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala, México.

Punto	Ca (Cmol <sup>(+)</sup> kg <sup>-1</sup> )	Mg	Na (%)	Cu	Zn	B (mg kg <sup>-1</sup> )	Fe	Mn
San Francisco Tetlanohcan								
1	11.6 a	0.00 f	0.00016 a	0.13 ab	0.27 b	0.32 b	3.44 d	0.96 d
2	5.2 f	1.56 d	0.00012 cd	0.11 bc	0.17 de	0.33 ab	1.97 i	0.53 i
3	8.0 cd	0.00 f	0.00013 bcd	0.13 ab	0.19 d	0.34 ab	3.49 c	1.15 b
4	8.1 cd	0.00 f	0.00015 ab	0.12 abc	0.19 d	0.34 ab	3.98 a	1.83 a
5	6.0 ef	4.10 a	0.00015 ab	0.14 a	0.14 fg	0.32 b	3.30 f	0.90 e
Teolocholco								
1	10.0 b	1.13 b	0.00014 abc	0.10 c	0.13 g	0.33 ab	1.86 j	0.52 i
2	8.3 c	0.00 f	0.00012 cd	0.10 c	0.23 c	0.34 ab	3.52 b	0.77 g
3	6.1 e	2.06 c	0.00011 d	0.11 bc	0.16 ef	0.35 a	2.28 h	0.58 h
4	5.8 ef	1.46 e	0.00016 a	0.12 abc	0.23 c	0.34 ab	3.35 e	0.99 c
5	7.2 d	2.26 b	0.00015 ab	0.12 abc	0.32 a	0.34 ab	2.77 g	0.83 f

Letras diferentes por columna indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

Media de Tukey.

En cuanto a la concentración de Zn en el Punto 5 de TL, el valor fue más significativo ( $p < 0.05$ ), pero deficiente ( $< 0.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ), al igual que en todos los suelos de TL y SFT. La concentración de B fue baja ( $< 0.39 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Semarnat, 2002), pero significativamente mayor en el Punto 3, y el contenido de Na no representó un problema (Cuadro 4).

El análisis de las bases intercambiables en los diferentes suelos tuvo una variación en el contenido de K, Ca, Mg y Na. Murga-Orrillo *et al.* (2021) documentan que los contenidos de K, Ca, Mg y Fe disminuyen con el aumento de la altitud por la influencia de las bajas temperaturas y humedad, lo que no ocurre en este estudio.

## Análisis de Componentes Principales

El análisis de correlación mostró que la *DA* fue la variable que tuvo más interacciones significativas y negativas, destacaron las correspondientes con el Mn ( $r=-0.86$ ), *CC* ( $r=-0.85$ ), *PMP* ( $r=-0.75$ ) y *HA* ( $r=-0.85$ ); esto indica que a mayor *DA*, el agua aprovechable tenderá a disminuir y habrá una mayor compactación en los suelos; por lo tanto, disminuirá el espacio poroso, lo que afectará el crecimiento radical de las plantas, la dinámica de la *MO* y la actividad biológica del suelo (Díaz *et al.*, 2018). Por otro lado, la *MO* se correlacionó significativa y positivamente con el contenido de N total ( $r=0.99$ ) y con el contenido de B ( $r=0.72$ ). Álvarez-Arteaga *et al.* (2020) indican en sus resultados que la condición de los suelos forestales se fundamenta por la relación entre la disminución en el contenido de carbono orgánico, N total, pH y porosidad con el incremento de la *DA*, situación que se observa en los suelos bajo estudio.

Las diferentes variables se agruparon en tres componentes principales (Cuadro 5) todos con un valor propio  $>1$ , los cuales en conjunto explicaron 70 % de la varianza total. El primer componente principal (8.01) explicó 38 % de la varianza; se conformó por la porosidad, *DA*, *CC*, la *HA* y el contenido de Mn, y se asocia al espacio poroso.

**Cuadro 5.** Proporción de la variación explicada por cada componente principal.

Componente	Valor	% Varianza total	% Varianza acumulada
1	8.01	0.38	0.38
2	3.53	0.17	0.55
3	3.18	0.15	0.70
		Autovectores	
Variable	CP1	CP2	CP3
Porosidad	0.32	0.05	0.05

---

Densidad aparente	-0.31	-0.03	-0.07
Capacidad de campo	0.32	0.04	-0.01
Punto de marchitez permanente	0.29	-0.21	0.13
Humedad aprovechable	0.31	0.09	-0.05
pH	-0.21	-0.11	0.38
Materia orgánica	0.25	-0.23	0.22
Conductividad eléctrica	-0.08	-0.23	0.34
Capacidad de intercambio catiónico	-0.13	0.25	0.38
N total	0.25	-0.26	0.23
P	0.22	0.04	-0.14
Ca	0.01	0.16	0.36
K	0.02	0.16	0.36
Na	0.08	0.36	0.28
Cu	0.01	0.43	-0.17
Zn	0.11	0.10	0.24
B	0.17	-0.40	-0.09
Fe	0.22	0.32	-0.04
Mn	0.31	0.22	-0.06

---

El segundo componente (3.53) con 17 % de la varianza, se relacionó con la condición nutrimental del suelo, la cual se explica por el Na, Cu y B; este último correlacionó positivamente con la *MO*. El tercer componente (3.18) con 15 % de la varianza total, se relacionó con la capacidad de carga del suelo y se definió por el pH, la *CIC* y el contenido de Ca y K (Cuadro 5).

El Análisis de Componentes Principales evidenció que la mayor variación (primer componente) está representada por la porosidad, *CC*, *HA*, Mn y *DA*, esta última implica que entre más se incrementen existirán problemas de degradación. Bolaños *et al.* (2016) señalan que en la zona de La Malinche existe erosión extrema en 16.76 % de su superficie, fuerte en 16.28 %, leve en 15.55 % y moderada con 44.39 %, porcentajes que pueden incrementarse debido a que La Malinche está perdiendo, en

su gradiente más bajo, gran parte de su cobertura vegetal por efecto del cambio climático (López, 2023). Pérez-Hernández *et al.* (2023) citan que el proceso de aprovechamiento de un bosque templado ocasiona un aumento en la *DA* y una reducción en la infiltración debido a la pérdida de la vegetación, troceo y arrastre de la madera.

El segundo componente está representado por el Na, Cu y B, aunque en todos los suelos las concentraciones de esos elementos fueron bajas (Cuadro 4). Das y Purkait (2020) consignan que el B es deficiente en suelos forestales derivados de cenizas volcánicas y su contenido depende de la degradación de la *MO* existente. En este sentido, la correlación positiva con la *MO* ( $r=0.72$ ) significa que, a mayor contenido de esta, existirá un incremento en la concentración de B, el cual es importante para el crecimiento radical de las especies arbóreas.

Finalmente, el tercer componente se asoció al pH, *CIC*, Ca y K. Vela-Correa *et al.* (2007) en cinco sitios localizados en un intervalo altitudinal de 2 900 a 3 600 m, con presencia de *P. montezumae* Lamb. y dentro del Parque Nacional La Malinche, registran suelos con un pH muy ácido, ricos en *MO*, una *CIC* media y una saturación de bases superior a 50 %, dominada por  $Ca^{2+}$ , e indican que a 3 600 msnm se aprecia un menor grado de perturbación por aclareo, tala o quema. Los indicadores obtenidos mediante el Análisis de Componentes Principales son de gran utilidad para determinar el efecto de las perturbaciones sobre algunas propiedades físicas y químicas del suelo, lo cual es importante para su conservación.

## Conclusiones

Se observa una disminución del espacio poroso en los suelos de Teolocholco y San Francisco Tetlanohcan, con diferentes niveles de perturbación, atribuida al incremento en la densidad aparente y a un bajo contenido de materia orgánica.

El Análisis de Componentes Principales permitió identificar que la densidad aparente, porosidad, humedad aprovechable, pH, capacidad de intercambio catiónico y los nutrientes esenciales, particularmente el K, Ca, Cu y B, pueden emplearse como indicadores para el monitoreo de la calidad física y química de los suelos en el Parque Nacional La Malinche. Estos hallazgos sugieren la importancia de implementar estrategias de rehabilitación dirigidas a detener la degradación de los suelos forestales del Área Natural Protegida estudiada.

### **Agradecimientos**

Se agradece ampliamente el apoyo de la MCA. Claudia Romero B. y a los propietarios de los sitios estudiados, quienes permitieron el acceso para desarrollar el presente trabajo.

### **Conflicto de intereses**

Las autoras manifiestan no tener conflicto de interés.

### **Contribución por autor**

Elizabeth García-Gallegos y Elizabeth Hernández-Acosta: determinación de variables, análisis de los datos, estructura del manuscrito.

### **Referencias**

Acevedo-Sandoval, O., M. A. Valera-Pérez y F. Prieto-García. 2010. Propiedades físicas, químicas y mineralógicas de suelos forestales en Acaxochitlán, Hidalgo, México. *Universidad y Ciencia* 26(2):137-150.

<https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0186->

29792010000200002&script=sci\_abstract. (26 de marzo de 2022).

Aguilar S., A., J. D. Etchevers B. y J. Z. Castellanos R. 1987. Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Texcoco de Mora, Edo. Méx., México. 217 p. <https://nautilo.iib.unam.mx/Record/000677391>. (3 de enero de 2021).

Álvarez-Arteaga, G., A. Ibáñez-Huerta, M. E. Orozco-Hernández y B. García-Fajardo. 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. Doi: 10.36677/qret.v22i2.13302.

Bhardwaj, K. K., M. K. Singh, D. Raj, S. Devi, ... and M. K. Sharma. 2022. Effect of tree leaf litterfall on available nutrients and organic carbon pools of soil. *Research Journal of Science and Technology* 14(4):226-232. Doi: 10.52711/2349-2988.2022.00037.

Blum, W. E. H. 2020. Basic concepts: Degradation, resilience, and rehabilitation. *In*: Lal, B., W. E. H. Blum, C. Valentin and B. A. Stewart (Editors). *Methods for assessment of soil degradation*. CRC Press. Boca Raton, FL, United States of America. pp. 1-16.

Bolaños G., M. A., F. Paz P., C. O. Cruz G., J. A. Argumedo E., V. M. Romero B. y J. C. de la Cruz C. 2016. Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana* 34:271-288. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00271.pdf>. (20 de octubre de 2022).

Corti, G., C. Urbinati, S. Cocco, C. Casucci, ... and A. Vitali. 2020. Forests and soils: Sustainable products and ecosystem services for human Well-Being. *In*: Longhi, S., A. Monteriù, A. Freddi, L. Aquilanti, ... and G. Monroncini (Editors). *The first outstanding 50 Years of "Università Politecnica delle Marche"*. Springer Nature. Cham, CH, Switzerland. pp. 617-630.

Das, A. K. and A. Purkait. 2020. Boron dynamics in soil: Classification, sources, factors, fractions, and kinetics. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 51(22):2778-2790. Doi: 10.1080/00103624.2020.1849261.

Díaz M., C., C. Herrera A. y K. Prada S. 2018. Características fisicoquímicas de suelos con relación a su conformación estructural. *Investigación e Innovación en Ingenierías* 6(1):58-69. Doi: 10.17081/invinno.6.1.2775.

Huang, J. and A. E. Hartemink. 2020. Soil and environmental issues in sandy soils. *Earth-Science Reviews* 208:103295. Doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103295.

InfoStat. 2008. Infostat. Software Estadístico. Manual del usuario. Versión 2008. Editorial Brujas. Córdoba, Cba, Argentina. 334 p. [https://www.researchgate.net/publication/283491340\\_Infostat\\_manual\\_del\\_usuario](https://www.researchgate.net/publication/283491340_Infostat_manual_del_usuario). (20 de octubre de 2021).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2010a. Compendio de información geográfica municipal 2010. Teolochocho, Tlaxcala. Clave geoestadística 29028. INEGI. Aguascalientes, Ags., México. 10 p. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/29/29028.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/29/29028.pdf). (4 de abril de 2022).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2010b. Compendio de información geográfica municipal 2010. San Francisco Tetlanohcan, Tlaxcala. Clave geoestadística 29050. INEGI. Aguascalientes, Ags., México. 10 p. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/29/29050.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/29/29050.pdf). (4 de abril de 2022).

Jiménez-Heredia, Y., C. M. Martínez-Bravo y N. J. Mancera-Rodríguez. 2010. Características físicas y químicas del suelo en diferentes sistemas de uso y manejo en el centro agropecuario Cotové, Santa Fe de Antioquia, Colombia. *Suelos Ecuatoriales* 40(2):176-188. [https://www.researchgate.net/publication/296662433\\_Caracteristicas\\_Fisicas\\_y\\_Qu](https://www.researchgate.net/publication/296662433_Caracteristicas_Fisicas_y_Qu)

imicas\_del\_Suelo\_en\_Diferentes\_Sistemas\_de\_Uso\_y\_Manejo\_en\_el\_Centro\_Agrop  
ecuario\_Cotove\_Santa\_Fe\_de\_Antioquia\_Colombia. (23 de abril de 2023).

López V., J. M. 2023. Marea roja en La Malinche: el ataque del descortezador.  
Revista Digital Universitaria 24(2):1-7. Doi:  
10.22201/cuaieed.16076079e.2023.24.2.19.

Martínez-Cruz, A., M. G. Carcaño-Montiel y L. López-Reyes. 2002. Actividad  
biológica en un transecto altitudinal de suelos de La Malinche, Tlaxcala. Terra  
Latinoamericana 20(2):141-146.  
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57320206>. (23 de mayo de 2023).

Meza P., E. y D. Geissert K. 2003. Estructura, agregación y porosidad en suelos  
forestales y cultivados de origen volcánico del Cofre de Perote, Veracruz, México.  
Foresta Veracruzana 5(2):57-60. <https://www.redalyc.org/pdf/497/49750209.pdf>.  
(10 de mayo de 2023).

Murga-Orrillo, H., M. F. Coronado J., C. Abanto-Rodríguez y F. De Almedia L. 2021.  
Gradiente altitudinal y su influencia en las características edafoclimáticas de los  
bosques tropicales. Madera y Bosques 27(3):e2732271 Doi:  
10.21829/myb.2021.2732271.

Murray, R. M., M. G. Orozco, A. Hernández, C. Lemus y O. Nájera. 2014. El sistema  
agroforestal modifica el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas del suelo.  
Avances en Investigación Agropecuaria 18(1):23-31.  
<http://aramara.uan.mx:8080/bitstream/123456789/415/1/2.pdf>. (17 de agosto de  
2023).

Pérez-Hernández, J. F., R. Razo-Zárate, R. Rodríguez-Laguna, J. Capulin-Grande, I.  
Árcega-Santillán y N. Manzur-Chávez. 2023. Efecto del manejo forestal en las  
características físico-hidrológicas del suelo en un bosque de clima templado. Revista  
Mexicana de Ciencias Forestales 14(80):54-79. Doi: 10.29298/rmcf.v14i80.1388.

Rodríguez F., H. y J. Rodríguez A. 2011. Métodos de análisis de suelos y plantas.  
Criterios de interpretación. Editorial Trillas S. A. de C. V. Benito Juárez, D. F., México  
239 p.

Rodríguez-Yon, Y., R. Chiriboga-Morocho, T. G. Concha-Egas y D. Ponce de León-Lima. 2020. Caracterización de las fracciones de glomalina en suelos Ferralíticos rojos con diferente uso. *Cultivos Tropicales* 41(4):e04. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362020000400004](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362020000400004). (29 de septiembre de 2023).

Secretaría de Economía (SE). 2008. NMX-FF-109-SCFI-2007, Humus de lombriz (lombricomposta)-especificaciones y métodos de prueba. Dirección General de Normas. Cuauhtémoc, D. F., México. 28 p. <https://bit.ly/2Ba4BbB>. (12 de julio de 2019).

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (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, Segunda Sección. 31 de diciembre de 2002. México, D. F., México. 73 p. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>. (13 de septiembre de 2019).

Tapia-Coronado, J. J., J. L. Contreras, J. Martínez-Atencia, L. López y J. L. Rodríguez. 2022. Producción y descomposición de hojarasca de especies forestales en sistemas silvopastoriles, Valle del Sinú, Colombia. *Agronomía Mesoamericana* 34(3):1-15. Doi: 10.15517/am.v34i1.49781.

Trujillo-González, J. M., J. D. Mahecha P. y M. A. Torres-Mora. 2018. El recurso suelo: un análisis de sus funciones, capacidad de uso e indicadores de calidad. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 9(2):29-37. Doi: 10.22490/21456453.2095.

Vázquez-Cuecuecha, O. G., E. M. Zamora-Campos, E. García-Gallegos y J. A. Ramírez-Flores. 2015. Densidad básica de la madera de dos pinos y su relación con propiedades edáficas. *Madera y Bosques* 21(1):129-138. <https://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v21n1/v21n1a10.pdf>. (17 de mayo 2023).

Vela-Correa, G., B. E. Vázquez-Martínez, M. de L. Rodríguez-Gamiño e I. V. Domínguez-Rubio. 2007. Caracterización edáfica de sitios con regeneración natural de *Pinus montezumae* Lamb. en el volcán La Malinche, México. *Agrociencia* 41(4):371-383.

[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952007000400371](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952007000400371). (25 de marzo de 2024).

Zalba, P. y N. Peinemann. 1987. Efecto de algunas especies forestales sobre ciertas propiedades fisicoquímicas del suelo. *Ciencia del Suelo* 5(1):71-76. [https://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol\\_5n1/Zalba.pdf](https://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_5n1/Zalba.pdf). (22 de marzo de 2021).

Zhu, X., X. Fang, L. Wang, W. Xiang, ... and Y. Kuzyakov. 2021. Regulation of soil phosphorus availability and composition during forest succession in subtropics. *Forest Ecology and Management* 502:119706. Doi: 10.1016/j.foreco.2021.119706.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.