

Artículos de investigación

Regionalización de indicadores de calidad para suelos degradados por actividades agrícolas y pecuarias en el altiplano central de México***Regionalization of quality indicators for degraded soils by agricultural and livestock activities in central plateau of Mexico***

Gustavo Álvarez-Arteaga*

Abel Ibáñez-Huerta**

María Estela Orozco-Hernández*

Belina García-Fajardo*

Recibido: octubre 21 de 2019.

Aceptado: mayo 05 de 2020

Resumen

La degradación del suelo es una de las principales amenazas ambientales, ya que su deterioro y pérdida de calidad implica la reducción de su capacidad para prestar diferentes funciones y servicios ambientales; por ello, es necesario su diagnóstico y evaluación desde etapas tempranas a partir del estudio de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, consideradas como indicadores de su calidad.

El objetivo de esta investigación consistió en seleccionar un grupo mínimo de indicadores de calidad del suelo para la zona de estudio, ubicada en la región norte del Estado de México, mediante la aplicación de métodos estadísticos multivariados, para, posteriormente, determinar la sensibilidad de cada uno de estos indicadores sobre los diferentes usos de suelo. Se tomaron 25 muestras de suelo a 30 cm de profundidad para sitios representativos de cinco condiciones de uso, en las cuales se analizó un grupo de 17 propiedades físicas, químicas y biológicas.

A través de pruebas de correlación lineal y de un análisis de componentes principales que explicó el 89% de la varianza total en el suelo se obtuvo un grupo mínimo de indicadores compuesto por el carbono orgánico del suelo, nitrógeno total, pH, densidad aparente, contenido de arcillas, fósforo y potasio. Los análisis de varianza y la prueba de Tukey ($p < 0.05$) determinaron diferencias significativas de estas variables para los usos de suelo, indicando que, en la medida en que se intensificó la alteración en los suelos, hubo una disminución hasta del 40% en el contenido de carbono orgánico, nitrógeno total y otros nutrimentos; por el contrario, se incrementó la densidad aparente y el contenido de arcillas. La aplicación del grupo mínimo de indicadores de calidad en el suelo obtenido para este estudio es una herramienta eficiente para diagnosticar su condición actual y contribuir en la toma de decisiones sobre su manejo y conservación.

Palabras clave: degradación, uso de suelo, indicadores, calidad del suelo, componentes principales.

*Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Planeación Urbana y Regional, México, **Universidad Nacional Autónoma de México, México. Correos electrónicos: galvareza68@gmail.com, abel.ibanz@gmail.com, eorozcoh61@hotmail.com y belygf@gmail.com.

Abstract

Soil degradation is one of the main environmental threats since its deterioration and loss of quality implies the reduction of its capacity to provide different environmental functions and services, therefore, it is necessary to diagnose and evaluate it from an early stage from the study of its physical, chemical and biological properties, considered as indicators of its quality.

The objective of this paper was to select a minimum group of soil quality indicators for the study area, located in the northern region of the State of Mexico, by applying multivariate statistical methods to subsequently determine the sensitivity of each of these indicators on the different land uses. 25 soil samples were taken at a depth of 30 cm for representative sites of five conditions of use, in which a group of 17 physical, chemical, and biological properties were analyzed.

Through linear correlation tests and an analysis of main components that explained 89% of the total variance in the soil, a minimum group of indicators was obtained, composed of soil organic carbon, total nitrogen, pH, apparent density, content clay, phosphorus, and potassium. The analysis of variance and the Tukey test ($p < 0.05$) determined significant differences of these variables for the land uses, indicating that, as the alteration in the soils intensified, there was a decrease of up to 40% in the content of organic carbon, total nitrogen, and other nutrients; on the contrary, the apparent density and the clay content increased. The application of the minimum group of quality indicators in the soil obtained for this study is an efficient tool to diagnose its current condition and contribute to making decisions about its management and conservation.

Keywords: degradation, indicators, land use, soil quality, main components.

Introducción

La degradación del suelo se considera como una de las principales amenazas ambientales en el planeta por sus implicaciones sobre la pérdida de funcionalidad de los ecosistemas al reducir su biodiversidad, comprometer la producción de alimentos, la disponibilidad de agua e incrementar la emisión de Gases de Efecto Invernadero (Koch *et al.*, 2013; Lal, 2015). En México, se estima que entre el 55% y el 90.7% de los suelos presenta algún tipo e intensidad de degradación (SEMARNAT-COLPOS, 2003; CONAFOR-SEMARNAT-UACH, 2013); por tal motivo, la atención de este problema debería ser prioritaria en la agenda ambiental nacional.

Cuando el suelo es degradado, las afectaciones más evidentes involucran daños en sus componentes y propiedades, reflejados en la pérdida de estructura y agregación, disminución de su capacidad de infiltrar agua, acidificación, acumulación de sales, incremento de la toxicidad, menor disponibilidad de nutrientes, así como la pérdida de biota y necromasa edáfica (Lal, 2015; Cullotta, Bagarello & Baiamonte, 2016; Bonfante, Terribile & Bouma, 2019), disminuyendo la resiliencia de los sistemas ambientales ante fenómenos naturales y antrópicos.

Partiendo de la necesidad por conocer el desempeño que tiene el suelo dentro de los sistemas ambientales, Doran & Parkin (1994) y Karlen *et al.* (1997) propusieron el concepto de calidad del suelo, definido como: "La capacidad de éste para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, de tal forma que permita sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y agua, sostener la salud humana y el hábitat, filtrar, amortiguar e inmovilizar contaminantes, almacenar y reciclar nutrientes". La aplicación de dicho concepto implica la evaluación de propiedades y procesos edáficos, integrándolos como indicadores de calidad, que, al ser comparados con valores o condiciones de referencia, permiten detectar alteraciones en el suelo, provocadas por cambios de uso o prácticas de manejo (Moges, Dagnachew & Yimer, 2013; Bautista y Etchevers, 2014; Mei *et al.*, 2019).

Si bien existe un consenso generalizado sobre la importancia de la calidad del suelo, su implementación práctica sigue siendo objeto de amplio debate: algunas investigaciones inicialmente sugirieron la aplicación de un grupo estandarizado de indicadores que pudiera proveer de información confiable y significativa en su evaluación (Doran & Parkin, 1994); no obstante, las evidencias acumuladas apuntan hacia la necesidad de considerar indicadores o grupos de indicadores específicos que no sólo respondan a la diversidad edáfica regional, sino también a las prácticas locales de uso y manejo de los sistemas ambientales, así como a la capacidad científica y técnica disponible para efectuar dichos estudios (Ghaemi *et al.*, 2014; Baridón y Casas, 2014, Teferi, Bewket & SImane, 2016).

Actualmente, existen diferentes esquemas para determinar la calidad del suelo: desde aquellos que emplean evaluaciones visuales cualitativas de atributos físicos, químicos y biológicos en campo (Karlen *et al.*, 2003; Xue *et al.*, 2010), los métodos analíticos simples que establecen empíricamente relaciones de causa efecto sobre determinadas propiedades edáficas (Zhao *et al.*, 2012; Tellen & Yerima, 2018), el uso de modelos estadísticos simples que relacionan dos o más variables aplicando pruebas de correlación lineal, regresiones lineales sencillas y múltiples para generar modelos predictivos (Olivera-Viciedo *et al.*, 2018; Rahangdale *et al.*, 2018), hasta la creación de índices de calidad, mediante la selección y ponderación de un cuadro mínimo de variables y atributos obtenidos con métodos estadísticos multivariados (Teferi *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2016; Mei *et al.*, 2019).

Considerando las capacidades técnicas locales, la regionalización de los indicadores de calidad puede constituirse como una herramienta útil para identificar condiciones incipientes de degradación o procesos de recuperación en los suelos de ecosistemas naturales o productivos de países en vía de desarrollo que carecen de recursos suficientes para realizar estudios extensivos de sus suelos.

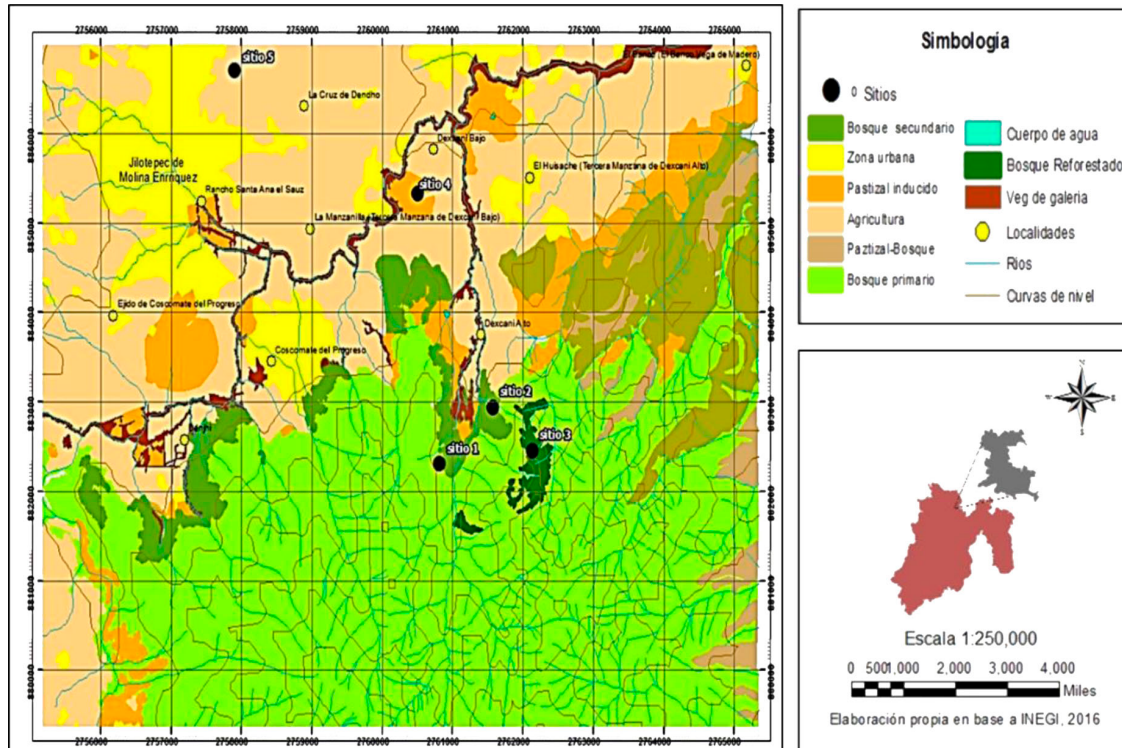
En la región norte del Estado de México, perteneciente al altiplano central del país, el desplazamiento de los ecosistemas primarios por actividades productivas ha propiciado históricamente la degradación de los suelos, para lo cual se han emprendido acciones de restauración por parte de autoridades y pobladores; sin embargo, estos esfuerzos locales han carecido de un monitoreo sistemático del grado de avance en la recuperación de suelos que determine la eficiencia de dichas estrategias, por lo que el objetivo principal de este estudio consistió en obtener un grupo mínimo de indicadores regionales de calidad del suelo mediante métodos estadísticos multivariados, partiendo de un set de 17 propiedades edáficas evaluadas en suelos bajo uso forestal, agrícola y pecuario. Posteriormente, se determinó la sensibilidad de cada uno de estos indicadores sobre los usos de suelo estudiados.

Metodología

Zona de estudio

El estudio se realizó en terrenos de una comunidad rural dentro del municipio de Jilotepec, Estado de México, situada en la región centro del país; aproximadamente, a 100 km al norte de la Ciudad de México ($19^{\circ} 52' 02''$ N y $99^{\circ} 26' 37''$ O) (figura 1). La zona presenta un clima templado subhúmedo con temperatura promedio anual de 16°C y una precipitación promedio anual de 750 mm (INEGI, 2001); fisiográficamente, es punto de convergencia de las subprovincias Lagos y Volcanes de Anáhuac y Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo, ambas pertenecientes al Eje Neovolcánico. Las topoformas dominantes son de sierra, lomeríos de colinas redondeadas y llanuras en su parte baja. Predominan las rocas ígneas basálticas, andesíticas y brechas volcánicas del terciario y cuaternario. Los suelos dominantes son Luvisoles, Vertisoles y en menor proporción Phaeozems (INEGI, 2001, 2016).

Figura 1. Ubicación geográfica de los sitios de estudio



Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2016).

Para llevar a cabo esta investigación, se realizó un análisis geomorfológico para delimitar un transecto representativo de las diferentes unidades de paisaje y uso de suelo dentro de un rango de los 2,420 a los 2,650 msnm; se identificaron cinco condiciones de uso de suelo: Bosque Conservado (BC), Bosque Secundario (BS), Bosque Reforestado (BR), Pastizal Inducido (PI) y Agricultura de Riego (AR).

El sitio 1 (BC) se localiza en la posición de ladera alta y la cobertura forestal está dominada por encinos (*Quercus* spp.), asociados con individuos de los géneros *Pinus*, *Arbutus* y *Prunus*; para el sitio 2 (BS), a los géneros ya mencionados se intercalan individuos de *Buddleia*, *Cupressus* y *Eucaliptus*, como resultados de prácticas locales de reforestación que datan de hace 30 años (SEMARNAT, 2014). En ambos sitios, el suelo dominante corresponde a un Luvisol crómico (INEGI, 2001).

Aunque de características similares a BC, en el sitio BS, la tala furtiva y el sobrepastoreo provocaron su degradación al punto en que el 75% del horizonte superficial se ha perdido por erosión hídrica, dejando descubierto su horizonte argílico (Bt). El sitio 3 (BR), posicionado en la ladera media, corresponde a un terreno forestal muy degradado en el pasado y posteriormente reforestado hace más de 30 años con individuos de *Cupressus* y *Eucaliptus*. El suelo corresponde a un *Phaeozem háplico* y tiene una profundidad no mayor a 40 cm, con más del 75% de cobertura por fragmentos rocosos en superficie.

El sitio 4 (PI) se localiza en el piedemonte, en terrenos adyacentes a una comunidad rural y está sujeto a prácticas de pastoreo intensivo, evidenciadas por la fuerte compactación del suelo, un escaso crecimiento de las gramíneas a lo largo del año y la prevalencia de especies herbáceas poco palatables para el ganado, distribuidas en manchones dispersos. El suelo corresponde a un *Vertisol pélico*, con alto contenido de arcillas expandibles (INEGI, 2001). El sitio 5 (AR), también *Vertisol*, está bajo régimen de agricultura de riego de especies anuales en rotación, como: maíz (*Zea mays*), avena (*Avena sativa*) y alfalfa (*Medicago sativa*), con aporte de abonos orgánicos y fertilizantes.

Muestreo de suelos y análisis de laboratorio

En cada sitio se delimitó una superficie representativa de 400 m², ubicando un punto central de cual se desplegaron cuatro puntos más en forma concéntrica a una distancia de 10 metros de separación con respecto al punto central. Para determinar las propiedades físicas y químicas del suelo, en cada punto se tomó una muestra de un kilogramo de suelo a una profundidad de 30 cm ($n = 5$) y por separado se tomaron tres submuestras para la determinación de humedad, densidad aparente, densidad relativa y porosidad mediante cilindros de PVC de 5 cm de diámetro ($n = 15$). Las muestras de suelo se llevaron a laboratorio para su secado a temperatura ambiente, triturado y tamizado en malla de 2 mm para los análisis correspondientes.

Los análisis físicos, químicos y biológicos se efectuaron siguiendo los procedimientos descritos por Reeuwijk (2002) y la NOM-021 RECNAT-2000 (2002). Para cada muestra, la humedad se determinó por el método gravimétrico; la densidad aparente, por el método del cilindro inalterado; la densidad real, por el método del picnómetro; la textura, por Bouyoucos; el pH en agua y KCl en relación 1:2.5 se obtuvo con potenciómetro (Corning, modelo 58907); el carbono orgánico, por combustión en húmedo; el Nitrógeno total, por micro Kjendahl; la capacidad de intercambio catiónico a pH 7, se estableció con acetato de amonio; la conductividad eléctrica, por conductímetro (Hanna, HI8033); y el fósforo asimilable, por el método de Bray I.

Análisis estadísticos

Siguiendo los procedimientos propuestos por Ghaemi *et al.* (2014), Jamioy, Menjivar y Rubiano (2015); Yang *et al.* (2016) y Teferi *et al.* (2016), y con objeto de reducir el sistema de variables a un grupo mínimo de indicadores que pudieran explicar la variabilidad inherente a la calidad de los suelos de estos sistemas ambientales, se realizó la prueba de análisis de componentes principales (ACP), calculado sobre la base de la matriz de correlación de variables.

Para este ejercicio, sólo se seleccionaron los CP con valores > 1 , pues se considera que son los de mayor contribución para la explicación de la variabilidad total del sistema (Ghaemi *et al.*, 2014). Se optó por analizar los datos sin ninguna transformación y, de acuerdo con su peso dentro del ACP, se procedió a identificar aquellas variables edáficas que permitieran explicar los cambios con relación a su uso.

Cada CP responde a una combinación lineal de las variables originales y el valor propio asociado a cada variable representa la contribución de ésta al CP. Bajo este criterio, sólo fueron seleccionadas para la interpretación del CP las variables cuyo peso fuera > 0.6 . Posteriormente, para cada propiedad seleccionada, se efectuó un análisis de varianza de una vía, así como la prueba de Tukey para determinar la diferencia mínima significativa ($p > 0.05$) de las propiedades seleccionadas para los diferentes tipos y usos de suelo. Los análisis estadísticos se realizaron con los paquetes estadísticos PASW Statistics (V.18) y XLSTAT (V. 2017.1).

Resultados

El análisis de correlación lineal de las 17 propiedades del suelo identificó un total de 153 interacciones; de las cuales, 73 resultaron significativas (48%) ($P < 0.05$) (cuadro 1), lo cual indica que estos atributos del suelo pueden ser agrupados en componentes basados en sus patrones de correlación. El COS fue la variable con mayor número de interacciones significativas (13), seguido de la fracción de arcillas, K y DA (12, 11 y 10, respectivamente).

Destaca que la DA presenta correlaciones significativas negativas con un gran número de variables con las que se relaciona, siendo las más intensas con la porosidad y COS ($R = -0.863$ y -0.746 , respectivamente).

Cuadro 1. Coeficientes de correlación entre las variables edáficas estudiadas para los diferentes usos de suelos

Variable	Hum	DA	DR	POR	ARE	ARC	LIM	pH ⁽¹⁾	pH ⁽²⁾	CE	COS	Nt	C/N	P	K	Ca	Mg
DA	-.723**																
DR	-.606**	.527**															
POR	.504*	-.863**	-0.036														
AREN	.492*	-0.319	-.407*	0.164													
ARC	-.590**	.481*	.641**	-0.194	-.822**												
LIM	0.371	-.411*	-.574**	0.12	0.094	-.644**											
pH ⁽¹⁾	-0.061	-.436*	-0.148	0.395	0.132	-0.048	-0.093										
pH ⁽²⁾	0.001	-0.334	-0.162	0.288	0.34	-0.152	-0.192	.905**									
CE	0.095	-.409*	-0.202	0.334	-0.022	0.014	0.005	.498*	.492*								
COS	.899**	-.746**	-.599**	.524**	.581**	-.762**	.552**	-0.032	0.001	0.147							
Nt	.792**	-.711**	-0.301	.605*	.575*	-.632*	0.296	0.187	0.236	0.181	.824**						
C/N	0.272	-0.347	-0.026	0.33	0.069	-0.236	0.293	-0.017	-0.178	0.109	0.408	-0.051					
P	-.648**	0.389	.478*	-0.176	-0.229	.561**	-.673**	.441*	.492*	0.22	-.674**	-0.448	-0.423				
K	.761**	-.737**	-.766**	.425*	.460*	-.646**	.511**	0.238	0.215	0.247	.698**	.593*	0.463	-.498*			
Ca	-.472*	0.191	.431*	0.03	-0.038	.425*	-.691**	.568**	.652**	0.269	-.544**	-0.199	-0.409	.838**	-0.332		
Mg	-.543**	0.357	.427*	-0.16	-0.129	.500*	-.701**	.405*	.464*	0.147	-.653**	-.562*	-0.199	.808**	-0.362	.809**	
CIC	.601**	-.428*	-.399*	0.293	.702**	-.630**	0.157	-0.034	0.038	-0.038	.554**	0.362	0.393	-.479*	.582**	-0.212	-0.271

DA: Densidad Aparente, DR: Densidad Real, CE: Conductividad Eléctrica, COS: Carbono Orgánico del Suelo, Nt: Nitrógeno total, C/N: Relación Carbono-Nitrógeno, P: Fósforo, K: Potasio, Ca: Calcio, Mg: Magnesio, CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico. **La correlación es significativa a un nivel de 0.01. *La correlación es significativa a un nivel de 0.05.

Fuente: elaboración propia.

Las variables edáficas estudiadas se agruparon en cinco componentes principales; todos con un valor propio mayor a 1 (cuadro 2) que en conjunto explicaron el 89.6% de la varianza; este valor provee de una buena síntesis del comportamiento de las variables originales. Adicionalmente, se obtuvieron las comunialidades de cada variable, indicando que los cinco CP explicaron en promedio > 80% de su varianza, con el mínimo de 72% para CE y máximo de 98% para Nt.

El orden de interpretación de los CP se realizó en función de la magnitud de su valor propio; el primer componente principal (7.19) explicó 39.95% de la varianza y quedó conformado por COS, Humedad, Nt, K, P, DA y arcillas. Dada la fuerte correlación del COS con las demás propiedades del primer componente, se optó por denominarlo materia orgánica; la característica principal de esta interacción de variables es la fuerte correlación negativa que guardan DA y arcillas con la mayoría de las propiedades que lo integran, lo cual sugiere que la pérdida de componentes orgánicos se vincula con el deterioro de las propiedades físicas del suelo (Lal *et al.*, 2015; Duval *et al.*, 2016).

Cuadro 2. Resultados del análisis de componentes principales para las propiedades del suelo

Variables	Componente					Comunalidad
	1	2	3	4	5	
Humedad	.855	.010	.113	.121	-.268	.829
DA	-.750	-.539	.047	-.330	.037	.966
DR	-.525	-.038	.620	.435	.011	.851
POR	.510	.541	.291	.558	-.058	.953
ARE	.530	.251	.485	-.585	.173	.951
ARC	-.796	.017	-.048	.508	-.199	.935
LIM	.617	-.340	-.528	-.084	.103	.792
pH (1)	.125	.907	-.237	-.077	.171	.930
pH (2)	.061	.944	-.110	-.270	.065	.984
CE	.177	.670	-.456	.169	.042	.718
COS	.912	.164	.261	.085	-.159	.959
Nt	.821	.229	.234	-.081	-.444	.985
C/N	.423	-.138	-.019	.478	.708	.929
P	-.723	.612	-.002	-.134	-.016	.915
K	.850	.094	-.346	.135	.043	.872
Ca	-.550	.771	.224	-.026	-.052	.950
Mg	-.698	.504	.053	.007	.232	.797
CIC	.543	-.092	.544	-.147	.441	.815
Eigenvalue	7.19	4.26	1.88	1.64	1.17	
% Varianza total	39.95	23.69	10.38	9.11	6.50	
Varianza acumulada %	39.95	63.64	74.02	83.12	89.62	

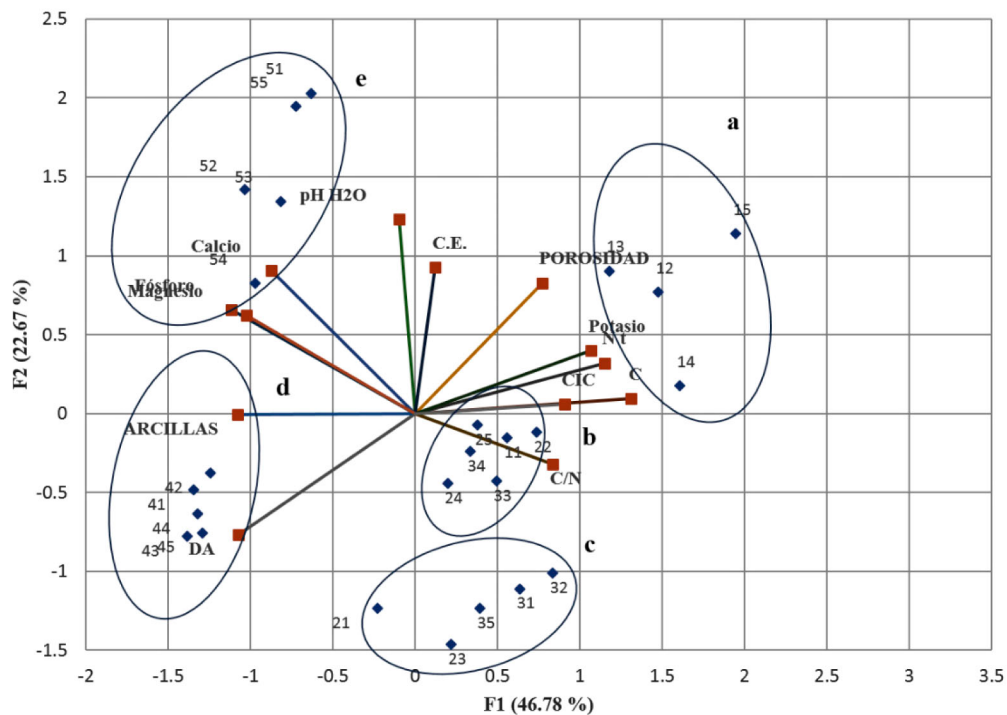
Fuente: elaboración propia.

El segundo componente (4.26) se relacionó con la acidez del suelo, que se explica por la relación fuertemente positiva entre el pH y la CE, Ca y Mg. Todas estas variables tienen correlaciones significativas entre sí. El tercer componente (1.88) se denominó fracción mineral del suelo y representa valores altos para DR, limos y moderados en el caso de arenas y CIC. El cuarto componente fue denominado porosidad del suelo, dada la relación de esta variable con las fracciones minerales del suelo. Finalmente, el quinto componente, representado por la relación C/N, identificaría la naturaleza bioquímica de los componentes orgánicos del suelo. La interacción CP1-CP2 fue la que mejor separó las propiedades del suelo en función de los diferentes usos y variables edáficas (figura 2).

Con los casos de estudio (n = 25) se formaron cinco grupos coincidentes con los usos de suelo: a) BC, b) BS, c) BR, d) PI y e) AR. El grupo *a* quedó representado por los casos para BC, en los cuales se destacan los mayores contenidos de COS, Nt y otros nutrientes del suelo, así como las mejores condiciones físicas (alta porosidad y baja DA)

para el desarrollo de los procesos edáficos. Los grupos *b* y *c*, representados por los casos de BS y BR, exhiben un decremento progresivo de la calidad en las condiciones físicas y químicas de los suelos en la medida en que se intensifica su alteración. Estos tres grupos, correspondientes a suelos forestales, ejemplifican de manera adecuada los efectos de cambio de uso sobre la cubierta edáfica. Por otra parte, los grupos *d* y *e*, representados por los casos de PI y AR, ambos *Vertisoles*, demuestran cómo una misma unidad de suelo responde de manera diferencial a su manejo: en el caso de PI, el sobrepastoreo ocasiona el incremento de la DA, mayor compactación de la capa arcillosa superficial, así como menor disponibilidad de MO y otros nutrimentos con relación a AR (figura 2).

Figura 2. Interacción de las propiedades y usos de suelo para el primer y el segundo componente principal: a) Bosque Conservado, b) Bosque Secundario, c) Bosque Reforestado, d) Pastizal Inducido, e) Agricultura de Riego



Fuente: elaboración propia a partir del programa estadístico XLSTAT (V.2007.1).

Sensibilidad de los indicadores seleccionados ante los usos de suelo

Considerando los resultados previos, el ACP sugiere el siguiente cuadro de variables para integrar un grupo mínimo de indicadores que sea capaz de sintetizar la variabilidad edáfica local: COS, Nt, DA, pH, P, K, % arcillas. A partir de este grupo de variables y mediante el ANOVA de una vía, se pudieron establecer las siguientes comparaciones por variable entre usos de suelo (cuadro 3).

Cuadro 3. Diferencias estadísticas de los indicadores de calidad del suelo para las diferentes condiciones de uso de suelo

Variables	BC	BS	BR	PI	AR
D A (g. cm ⁻³)	0.63±0.12 a	0.93 ± .19 b	0.95 ± 0.16 b	1.42 ± 0.06 c	0.86 ± 0.07 ab
Arcillas (%)	17.2± 6.48 a	49.6 ± 8.41b	32.2 ± 4.58 c	49.2 ± 2.45 b	50.62 ± 2.60 b
pH (H ₂ O)	6.14 ± 0.16 a	5.28 ± 0.52 b	5.39 ± 0.53 b	5.35 ± 0.04 b	6.95 ± 0.2 c
COS (g.kg ⁻¹)	36.2 ± 9.8 a	22.5 ± 5.4 b	26.8 ± 4.2 ab	10.5 + 1.6 c	13.3 ± 4.4bc
Nt g.kg ⁻¹)	3.5 ± 1.0 a	2.1 ± 0.6 b	2.9 + 0.2 ab	1.14 + 0.2 bc	2.0 ± 0.6 b
P (ppm)	52.8 ± 8.23 a	49.0 ± 7.68 a	49.4 ± 5.37 ab	112.40 ± 15.31 b	125 ± 20.96 b
K (ppm)	440 ± 142.13a	232 ± 104.5 b	210 ± 59.16 b	32 ± 15.31 c	180 ± 37.42 bc

Los valores entre los segmentos de uso de suelo con letras diferentes indican diferencias significativas a P< 0.05. BC, Bosque Conservado; BS, Bosque Secundario; BR, Bosque Reforestado; PI, Pastizal Inducido; AR, Agricultura de Riego. DA, Densidad Aparente; COS, Carbono Orgánico del Suelo; P, Fósforo; K, Potasio.

Fuente: elaboración propia.

De manera general, en la zona de estudio predominan suelos superficiales con texturas medias y finas, cuyo contenido de arcillas fluctuó entre 17% y 50%, registrando el contenido más bajo para el suelo de BC y los más altos para BS, PI y AR. Esta variabilidad, si bien está relacionada con los procesos pedogenéticos que determinan la distribución de las unidades de suelo, en el caso de BS, el elevado contenido de arcillas en la capa superficial (estadísticamente similar a PI y AR) obedece a la remoción por erosión hídrica del horizonte A original, dejando expuesto el horizonte subsuperficial arcilloso (Bt), característico de los *Luvissolos*. La DA mostró diferencias significativas entre BC con respecto BS y BR, al igual que entre los suelos bajo uso agropecuario; este patrón es similar para la porosidad, por lo que, en primera instancia, el cambio de uso tiende a alterar estas propiedades considerando tanto los tipos de suelo como su uso actual.

El pH del suelo varía de ligero a moderadamente ácido con la disminución altitudinal; caso excepcional es el sitio AR, en el cual inferimos que las prácticas agrícolas (aplicación de enmiendas orgánicas y encalado) han propiciado la estabilización del pH en valores neutros, lo que favorece la mejor disponibilidad de nutrimentos para los cultivos.

Para el contenido de COS se observan diferencias significativas entre usos de suelo; el contenido más elevado fue para BC (36.2 g kg^{-1}), disminuyendo casi en 40% para BS. En los suelos arcillosos, AR registra valores ligeramente superiores a PI, lo cual es probable que se deba a la aplicación frecuente de abonos orgánicos a las tierras cultivadas.

La concentración de Nt fue altamente variable dentro del transecto, aunque siguió la misma tendencia que el COS, lo que se explica por la vinculación de ambos ciclos biogeoquímicos con la materia orgánica del suelo (Brejda *et al.*, 2000). Otras propiedades químicas y físicas químicas siguieron comportamientos similares a excepción de P, Ca y Mg, cuyos valores fueron más elevados para los suelos arcillosos, lo cual se relaciona con la mineralogía del material basáltico que les dio origen.

Discusión

Mediante las pruebas de sensibilidad efectuadas con el grupo mínimo de indicadores, es posible establecer un patrón general de alteraciones en los suelos a medida que se intensifica su cambio de uso y que se vincula con las siguientes etapas: remoción parcial o total de la cubierta vegetal original, reducción y compactación de la capa órgano-mineral superficial, incremento de escorrentía superficial, acidificación del suelo y erosión hídrica moderada en suelos de poca pendiente y severa para suelos de ladera. A través de la integración de este modelo empírico con el análisis de componentes principales fue posible establecer la relación que guardan las 17 variables edáficas estudiadas con respecto a estos patrones de cambio de uso.

En el caso de los componentes principales 1 y 2, referentes a la materia orgánica del suelo y a su acidez, nuestros resultados son consistentes con otros estudios que documentaron reducciones en el contenido de COS y disminución del pH en la capa superficial cuando hay conversión de bosques a otros usos (Bautista-Cruz *et al.*, 2012; Nosrati, 2013; Zhang *et al.*, 2015). Esta reducción se asocia con la alteración de otras propiedades físicas y químicas (Brejda *et al.*, 2000). En nuestro caso, esta condición para los suelos forestales está soportada por la relación que hay entre la disminución en el contenido de COS, Nt, pH, porosidad (pérdida de materia orgánica y nutrientes), con el incremento de la DA (mayor compactación) y el contenido de arcillas (erosión, lavado y afloramiento de horizonte argílico).

Esta correlación de variables, aunque en sentido inverso, es válida para los suelos bajo manejo agrícola (AR) y son consistentes con lo reportado por Duval *et al.* (2016) y Herrera *et al.* (2017), quienes encontraron que la incorporación de residuos y abonos orgánicos de manera periódica y otras prácticas de conservación y fertilidad de suelos tienden a preservar e, incluso, a incrementar los almacenes de carbono, así como a mejorar las tasas de infiltración y a aumentar la disponibilidad de nutrientes.

Siendo la formación y acumulación de arcillas uno de los procesos pedogenéticos dominantes para la zona, en los suelos con mayor pendiente (Luvisoles), estos minerales secundarios se acumulan en el horizonte subsuperficial; en tanto, para los *Vertisoles*, situados en la parte baja del sistema, parten de la superficie hasta una profundidad promedio de 70 cm; tal distribución determina el impacto que las prácticas de manejo ejercen sobre la estructura física del suelo.

En los primeros (representados por BS y BR), una vez que se han dado procesos de remoción parcial o total de la cobertura vegetal, el impacto del pastoreo o la labranza incrementa su compactación superficial, lo cual favorece los procesos erosivos que se intensifican con el tiempo, remueve la capa superficial rica en nutrientes y deja descubierto el horizonte argílico que por su menor infiltración predispone una mayor escorrentía superficial; condición similar a la descrita por Salamanca y Amézquita (2015) en suelos agrícolas arcillosos de Colombia.

Para los *Vertisoles* sería previsible que, por su elevado contenido de arcillas, deberían presentar DA más elevadas, como es el caso en este estudio; no obstante, aun dentro de este mismo grupo de suelos, se observa una diferencia significativa, la cual se explica por su manejo: sobrepastoreo y compactación en PI *vs.* prácticas de laboreo, rotación de cultivos, aplicación de abonos orgánicos en AR. En los suelos forestales, la diferencia en los valores de DA también se manifiesta entre BC *vs.* BS y BR, lo cual atribuimos principalmente a la condición de manejo y grado de perturbación manifestados en los dos últimos.

La compactación del suelo, ya sea por el uso intensivo de equipo agrícola o por sobrepastoreo, comprime la masa del suelo y destruye su estructura superficial y, como consecuencia, se disminuye la porosidad y se aumenta el volumen de sólidos y microporos (mayor DA) a medida que se intensifican las alteraciones (Reynolds *et al.*, 2007).

Conclusiones

Mediante esta investigación fue posible establecer un set mínimo de variables que explican el desempeño actual de los suelos dentro de la zona de estudio en función de su conformación natural y las prácticas de manejo. Ese grupo mínimo de indicadores regionalizados quedó integrado por el COS, Nt, DA, contenido de arcillas, pH, P y K. La interpretación de estos indicadores en función de los tipos y usos de suelo sugiere que los principales procesos que propician la degradación edáfica local están relacionados con las

alteraciones físicas (incremento de la densidad del suelo, disminución de la porosidad, incremento de la escorrentía y pérdida de capa orgánica) y químicas (disminución de COS, Nt y otros nutrimentos).

Al considerar la eficiencia de este grupo de variables para detectar alteraciones en el suelo, es factible proponer su aplicación como indicadores en el monitoreo de las acciones de conservación y rehabilitación de suelos degradados y, de esta forma, contar con información adecuada para la toma de decisiones sobre su mejor manejo y aprovechamiento.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Autónoma del Estado de México por la asignación de fondos para realizar esta investigación a través del proyecto UAEM 4559/2018/CIV.

Referencias

- Baridón, J.E. & Casas, R.R. (2014). Quality indicators in subtropical soils of Formosa, Argentina: changes for agriculturization process. *Int. Soil and Water Cons. Research*, 2(4), 13-24.
- Bautista-Cruz, A., del Castillo, R.F., Etchevers-Barra, J.D., Gutiérrez-Castorena, M.C. & Baez, A. (2012). Selection and interpretation of soil quality indicators for forest recovery after clearing of tropical montane cloud forest in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 277, 74-80. doi: 10.1016/j.foreco.2012.04.013
- Bautista-Cruz, A., y Etchevers, J.D. (2014). *Una revisión sobre los conceptos de la calidad del suelo: sus indicadores e índices*. Editorial Académica Española.
- Bonfante, A., Terribile, F., & Bouma, J. (2019). Refining physical aspects of soil quality and soil health when exploring the effects of soil degradation and climate change on biomass production: an Italian case study. *Soil*, 5, 1-14. doi: 10.5194/soil-5-1-2019
- Brejda, J.J., Moorman, T.B., Karlen, D.L., Karlen, D.L. & Dao, T.H. (2000). Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and southern high plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 2115-2124. Recuperado de: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/sssaj/articles/81/3/589>
- CONAFOR-SEMARNAT-UACH. (2013). *Línea Base Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación. Informe Final y Anexos I y II*. México. Recuperado de: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2018/06/linea-base-nacional-de-degradaci%C3%B3n-de-tierras-y-desertificaci%C3%B3n.pdf>
- Cullotta, S., Bagarello, V., & Baiamonte, G. (2016). Comparing different methods to determinate soil physical quality in a mediterranean forest and pasture land. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 80, 1038-1056. Recuperado de: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/sssaj/abstracts/80/4/1038>
- Doran, J.W., & Parkin, T.B. (1994). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. Recuperado de: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/books/tocs/sssaspecialpubl/definingsoilqua>
- Duval, M.E., Galantini, J.A., Martínez, J.M., y Iglesias, J.O. (2016). Comparación de índices de calidad de suelos agrícolas y naturales basados en el carbono orgánico. *Ciencia del suelo*, 34(2), 197-209.
- Ghaemi, M., Astarai, A.R., Emami, H., Nassiri, M. M., & Sanaeinejad, S.H. (2014). Determining soil indicators for soil sustainability assesment using principal components analysis of Astan Quds- east of Mashhad-Iran. *J. Soil Sci.Plant Nut*, 14, 987-1004.

- Herrera Culma, R., Calderón, L.I. & Gutiérrez-Malaxachebarria, A. M. (2017). *Soil quality index in conventional and semi-ecological farms producing plantain* (Musa AAB Simmonds cv. Dominic Harton) in Anolaima-Cundinamarca, Colombia. *Acta agronómica*, 66(4), 457-465.
- INEGI. (2001). *Síntesis de Información Geográfica del Estado de México*. México.
- INEGI. (2016). *Anuario Estadístico y Geográfico de México 2016*. México. Recuperado de: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/AEGPEF_2016/702825087357.pdf
- Jamioy, D., Menjivar, J.C. y Rubiano, Y. (2015), Indicadores químicos de calidad de suelos en sistemas productivos del piedemonte de los llanos orientales de Colombia. *Acta Agronómica*, 64(4), 302-307. doi: 10.15446/acag.v64n4.38731
- Karlen, D.L., Andrews, S.S., Weinhold, B.J., & Doran, J.W. (2003). Soil quality humankind's foundation for survival. *J. Soil Water Cons*, 58, 171-179.
- Koch, A., McBratney, A., Adams, M., Field, D., Hill, R., Crawford, J. & Zimmermann, M. (2013). Soil Security: Solving the Global Soil Crisis. *Global Policy*, 4(4), 434-441. doi: 10.1111/1758-5899.12096/full
- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability (Switzerland)*, 7(5), 5875-5895. Recuperado de <http://www.mdpi.com/2071-1050/7/5/5875/htm>
- Mei, N., Yang, B., Tian, P., Jiang, Y., Sui, P., Sun, D., Zhang, Z. & Qi, H. (2019). Using a modified quality index to evaluate densely tilled soils with different yields in Northeast China. *Environmental Science and Pollution Research*. doi: 10.1007/s11356-018-3946-2
- Moges A., Dagnachew, M., & Yimer. F. (2013). Land use effects on soil quality indicators: a case study of Abo-Wonsho Southern Ethiopia. *Applied and Envir. Soil Science*, 2013, 1-9. doi: 10.1155/2013/784989
- NOM-021-RECNAT-2000. (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000*. Diario oficial de la Federación 31-12-2002. Recuperado de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=717582&fecha=31/12/2002
- Nosrati, K. (2013). Assessing soil quality indicator under different land use and soil erosion using multivariate statistical techniques. *Environ Monit asses*, 185, 2895-2907. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10661-012-2758-y>
- Olivera-Viciedo, D., Hernández, A., Rodríguez, M., Lizcano, R., Calero, A., & Peña, K. (2018). Effects of land-use change on Nitisols properties in a tropical climate. *Revista de la Facultad Nacional de Agronomía. Medellín*, 71(3), 8601-8608.
- Rahangdale, C.P., Upadhyaya, S.D., Bisen, N. & Koshta, L.D. (2018). Physico-chemical properties and organic carbon stock in a Vertisol as influenced by different land use systems. *International Journal of Chemical Studies*, 6(3), 244-249
- Reeuwijk, L.V. (2002). *Procedures for Soil Analysis*. International Soil Wageningen. Netherlands. Reference and Information Centre (ISRIC). Recuperado de: https://www.isric.org/sites/default/files/ISRIC_TechPap09.pdf
- Reynolds, W. D., Drury, C. F., Fox, C. A., Tan, C. S., y Zhang, Q. T. (2007). Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. *Soil and Tillage Research*, 96, 316-330. doi: 10.1016/j.still.2007.07.003
- Salamanca Jiménez, A. & Amézquita Collazos, E. (2015). Influence of the intensity of use on some physical properties in a soil of the Valle del Cauca, Colombia. *Revista de investigación Agraria y Ambiental*, 6(1), 43-51.
- SEMARNAT. (2014). *Inventario estatal forestal y de suelos Estado de México 2014*. Recuperado de: <http://probosque.edomex.gob.mx/sites/probosque.edomex.gob.mx/files/files/inventarioFtal/inventarioEstatalFtalSuelosEdoMex2014.pdf>
- SEMARNAT-COLPOS. (2003). *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1: 250 000*. Memoria Nacional 2001-2002. México.
- Tellen, V. A., & Yerima, B. P.K. (2018). Effects of land use change on soil physicochemical properties in selected areas in the North West region of Cameroon. *Environmental Systems Research*, 7,3. doi: 10.1186/s40068-018-0106-1

- Teferi, E., Bewket, W., & Simane, B. (2016). Effects of land use and land cover on selected soil quality indicators in the headwater area of the Blue Nile basin of Ethiopia. *Environ Monit Asses*, 188,83. doi: 10.1007/s10661-015-5086-1
- Xue, Y.J., Liu, S.G., Hu, Y.M., & Yang, J.F. (2010). Soil quality assessment using weighted fuzzy association rules. *Pedosphere*, 20, 334-341. doi: 10.1016/S1002-0160(10)60022-7
- Yang, W., Han, Y., Zheng, F., Wang, Z., & Zhizhen Feng, Y.Y. (2016). Investigating spatial distribution of soil quality index and its impacts on corn yield in a cultivated catchment of the Chinese Mollisol region. *Soil Fertility & Plant Nutrition*, 80, 317-327.
- Zhao, X., Wu, P., Gao, X., & Persuad, N. (2015). Soil quality indicators in relation to land use and topography in small catchement on the loess plateau of China. *Land Degradation & Development*. 26, 54-61. doi: 10.1002/ldr.2199
- Zhang, K., Zheng, H., Chen, F. L., Ouyang, Z. Y., Wang, Y., Wu, Y. F. & Xiang, X. W. (2015). Changes in soil quality after converting Pinus to Eucalyptus plantations in southern China. *Solid Earth*, 6, 115-123. Recuperado de: <https://search.proquest.com/openview/24184991f20a7fb81b1ad0619e74f123/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2037675>