

Indicadores de calidad de suelos en bosques templados de la Reserva de la Biosfera los Volcanes, México

Soil quality indicators in temperate forests of the Volcanoes Biosphere Reserve, Mexico

Gerardo Cruz-Flores^{1*} , Eloisa A. Guerra-Hernández¹,
Juan M. Valderrábano-Gómez¹ y Julio Campo-Alves² 

¹ Edafología y Fisiología de la Nutrición Vegetal, UMIÉZ, FES Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México. Batalla 5 de mayo, esquina Fuerte de Loreto, Colonia Ejército de Oriente. 09230 Iztapalapa, Ciudad de México, México.

² Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. 04510 Coyoacán, Ciudad de México, México.

* Autor para correspondencia (edaynuve@gmail.com)

RESUMEN

La degradación y erosión edáfica por cambios de uso de suelo, disminuyen los contenidos de carbono y su calidad. Con el objetivo de identificar y reconocer los mejores indicadores de calidad edáfica y de relacionarla con sus contenidos de carbono orgánico, se realizó esta investigación en bosques de la Reserva de la Biosfera los Volcanes. Se seleccionaron 26 sitios distribuidos entre 2600 y 3800 m de altitud colectando muestras de suelo de 0 a -0.2 m para análisis físicos y químicos y entre 0 a -0.1 m para bioquímicos y biológicos. Los resultados mostraron como excelentes indicadores parciales para evaluar calidad del suelo (I_pCS) al pH, porcentaje de arena; contenido gravimétrico de agua, carbono orgánico, Ca^{+2} y K^{+} intercambiables; carbono de biomasa microbiana y actividad fosfatasa ácida y presencia/abundancia de bacterias y algas. Con estos I_pCS , se determinó aditivamente y conmutativamente, calidad total del suelo (CST_{sum} y CST_{mul}) cuyas tendencias fueron similares, aunque el modelo aditivo, muestra mejor que bosques afectados y vegetación secundaria (2600 y 2700 m) tienen menor calidad edáfica, mientras que en la franja media (3000-3300 m) con bosques de *Abies* y mixto *Abies-Pino*, los suelos tuvieron mayores contenidos de carbono orgánico y altas CST_{sum} y CST_{mul} .

Palabras clave: áreas naturales protegidas, bosques de coníferas, ecosistemas de montaña alta.

SUMMARY

Soil degradation and erosion decrease carbon content and soil quality due to changes in land use. In order to identify and recognize the best soil quality indicators and relate them to organic carbon content, this research was carried out in forests of the Volcanoes Biosphere Reserve. Twenty-six sites distributed from 2600 to 3800 m.a.s.l. were selected by collecting soil samples from 0 to -0.2 m for physical and chemical analyses and from 0 to -0.1 m for biochemical and biological analyses. The results showed pH, sand percentage; gravimetric water contents; organic carbon; exchangeable Ca^{+2} and K^{+} ; carbon microbial biomass; acid phosphatase activity; and presence/abundance of bacteria and algae as excellent partial indicators for evaluating soil quality (I_pCS). With I_pCS , total soil quality (CST_{sum} and CST_{mul}) was determined additively and commutatively showing similar tendencies; however, the additive model was better in showing that affected forests and secondary vegetation (2600 and 2700 m) have lower soil quality, while in middle and high fringe (3000-3300 m) with *Abies* forests and *Abies-Pine* mixed forests, soils had higher organic carbon content and high CST_{sum} and CST_{mul} values.

Index words: protected natural areas, coniferous forests, high mountain ecosystems.

Cita recomendada:

Cruz-Flores, G., E. A. Guerra-Hernández, J. M. Valderrábano-Gómez y J. Campo-Alves. 2020. Indicadores de calidad de suelos en bosques templados de la Reserva de la Biosfera los Volcanes, México. *Terra Latinoamericana* 38: 781-793.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.421>

Recibido: 13 de junio de 2019.

Aceptado: 16 de julio de 2020.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 38: 781-793.

INTRODUCCIÓN

El reconocimiento de los mejores indicadores de calidad del suelo es tarea complicada dadas tanto su multi-funcionalidad en los ecosistemas terrestres (Doran y Parkin, 1994) como la diversidad de suelos, los usos a los que se destinan (Watt *et al.*, 2005) y las diversas relaciones existentes entre sus diversas propiedades (Muñoz-Rojas, 2018). Reconocer la calidad del suelo es necesidad impostergable considerando que una alta calidad edáfica mejora la productividad de ecosistemas naturales, plantaciones forestales, es fundamental para mejorar la calidad del agua y del aire y garantiza la salud humana (Kelting *et al.*, 1999; Thomazini *et al.*, 2015; Gaia-Gomes *et al.*, 2020). Actualmente ya son reconocidas como indicadores de calidad del suelo algunas de sus propiedades físicas y químicas (Bautista *et al.*, 2004; Muñoz-Rojas, 2018; Bai *et al.*, 2020) y algunas bioquímicas como la actividad de exoenzimas hidrolasas que suelen contribuir al suministro nutrimental para la flora microbiana y la vegetación (Giacometti *et al.*, 2013; Nguyen y Marschner, 2017). La hidrólisis enzimática se relaciona estrechamente con el medio fisicoquímico y biológico del suelo a través de procesos edáficos estrechamente relacionados e interactuantes entre sí (Armenise *et al.*, 2013), por lo que para reconocer los mejores indicadores de calidad del suelo es permisible y pertinente la utilización de métodos estadísticos multivariados (Johnson, 2000; Li *et al.*, 2013). La Reserva de la Biosfera los Volcanes (RBLV), considerada como una región de importancia hidrológica y forestal prioritaria para la conservación biológica (Ferrari *et al.*, 2012; Arriaga *et al.*, 2000) posee ecosistemas fuertemente amenazados (Miehlich, 1980; Tobón *et al.*, 2017) por la alta densidad poblacional que la circunda (Becerra, 2018). Los bosques templados de esta reserva de la biosfera sufren intensa presión antrópica manifestada en una severa degradación y erosión de suelos que motiva esta investigación sobre las propiedades de los suelos con el fin de analizar su sensibilidad ante pérdidas de suelo y de carbono orgánico de sus horizontes superficiales. El objetivo de esta investigación fue reconocer los mejores indicadores de la calidad del suelo y su relación con los contenidos de carbono orgánico y con su fertilidad en bosques de *Pinus* spp. y *Abies religiosa* (Kunth Schltdl. et Cham.) en la Reserva de la Biosfera los Volcanes, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la exposición sur-occidental de la región de los Volcanes (RBLV) desde 2600 hasta 3800 m de altitud, se visitaron, seleccionaron y caracterizaron varios sitios forestales con representatividad de los principales biotopos, de esa región montañosa, en estructura y composición de la vegetación. La Figura 1 y el Cuadro 1 muestran que los sitios de la parte baja están sobre terrenos de lomeríos suaves (pendiente < 5%) con relictos de bosques de pino, vegetación secundaria y parcelas de cultivo y así gradualmente, en un intervalo altitudinal de ± 1200 m, se encuentran bosques de diversas especies de pino y oyamel en áreas escarpadas de alta montaña hasta el ecotono de bosques de pino-zacatonal montano.

En cada sitio se delimitaron cuadrantes de 50×20 m donde, para absorber variaciones del terreno y de distribución de la vegetación, se colectaron al azar, en zig-zag y de 0 a -0.2 m, al menos seis sub-muestras de suelo y formaron muestras compuestas que se secaron y tamizaron (malla 2 mm) para el análisis de sus propiedades físicas y químicas. Dada la mayor variabilidad que presentan las propiedades biológicas y bioquímicas, para su descripción y análisis se incrementó a ocho el número de submuestras colectadas en los mismos cuadrantes tomándolas de 0 a -0.1 m y almacenándolas a 4 °C hasta su procesamiento.

Se realizó por triplicado la determinación de conductividad eléctrica (CE), textura, densidades real y aparente, contenido gravimétrico de agua (CGA), espacio poroso y pH (1:2) del suelo. También se determinaron las concentraciones de Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} y Na^{+} intercambiables, P extractable (Bray I), C-orgánico y N-total con los métodos reportados en Robertson *et al.* (1999) y en la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Se determinó por cuadruplicado, contenido de carbono en biomasa microbiana (Robertson *et al.*, 1999), actividad de fosfatasa ácida y alcalina (Tabatabai, 1994) y se evaluó, la presencia/abundancia de poblaciones microbianas con el método de la placa de Rossi-Cholodny (Atlas *et al.*, 1998) el cual se complementó aplicando una escala semi-cuantitativa cuyo valor cero, se asigna para organismos ausentes; el valor uno, para baja abundancia (< 50% de los campos); dos, para alta abundancia (50 a 75%) y tres, para muy alta abundancia (>75%).

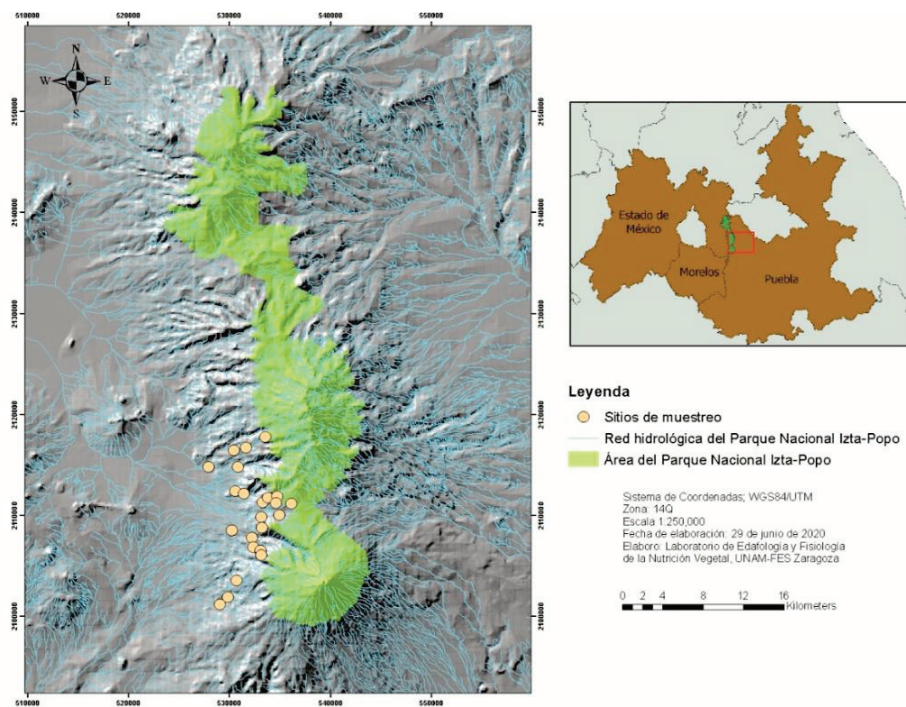


Figura 1. Sitios de trabajo y su ubicación en el Parque Nacional Iztaccihuatl Popocatepetl y su zona de influencia.
Figure 1. Location of study sites in Iztaccihuatl Popocatepetl National Park and its influence area.

Los conjuntos de datos de variables originales (VO) generados de las determinaciones físicas, químicas, bioquímicas y biológicas del suelo, se sometieron a análisis de componentes principales (ACP) que generan conjuntos menores de datos de variables robustas (VR) distinguidos por incluir la mayor variabilidad e información de las VO en un menor número de combinaciones lineales cuando sus eigenvalores ≥ 1 . Con ello ayudan a reconocer y seleccionar indicadores edáficos de calidad. Los conjuntos de datos nuevos (VR) deben estandarizarse y para cada componente principal en cada grupo de propiedades, se desarrollarán ecuaciones según el modelo siguiente:

$$IpCS = (K1 \times I1) + (K2 \times I2) + (K3 \times I3) + \dots + (Kn \times In)$$

donde:

$IpCS$ = indicadores parciales de calidad del suelo correspondientes a $I_{físicos}CS$ (Indicadores físicos); $I_{químicos}CS$ (Indicadores químicos); $I_{bioquímicos}CS$ (Indicadores bioquímicos) o $I_{biológicos}CS$ (Indicadores biológicos); K_1, K_2, \dots, Kn = constantes estandarizadas para cada variable; I_1, I_2, I_3, \dots, In = valor original de cada variable para cada sitio.

De estos valores inclusivos e integradores, generados al desarrollar las cuatro ecuaciones se destacarán los de mayor valor absoluto, se seleccionarán como indicadores parciales de calidad del suelo ($IpCS$) y con ellos, se calcularán los valores de calidad total del suelo por una vía conmutativa: $CST_{mul} = I_{físicos}CS \times I_{químicos}CS \times I_{bioquímicos}CS \times I_{biológicos}CS$ (Doran y Parkin, 1994) y, otra aditiva: $CST_{sum} = I_{físicos}CS + I_{químicos}CS + I_{bioquímicos}CS + I_{biológicos}CS$ (Johnson, 2000) y, para evaluar el grado de certidumbre existente y la relación entre valores de calidad de suelo total (CST_{mul} y CST_{sum}) respecto a sus $IpCS$, se seleccionarán las correlaciones de Pearson dadas entre calidad de suelo total contra cada variable robusta, que sea significativa ($P < 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción Edafo-Ecológica de Sitios de Estudio

Los atributos particulares derivados de la estructura paisajística y composición florística de la vegetación en cada uno de los 26 sitios estudiados, permitió agruparlos en alguna de las siguientes cinco ecorregiones: Una ubicada entre 2600 m y hasta poco

debajo de la cota de 2800 m presenta relictos de bosque mixto *Pinus montezumae-Quercus* spp.-*Alnus* spp. y vegetación secundaria (v1), Bosque de *Pinus teocote-Cupressus* spp.-vegetación secundaria (v2), Bosque de *Pinus* spp.-*Abies religiosa*-vegetación secundaria (v3) y Bosques de *Abies-Cupressus* (v4). La segunda ecorregión son Bosques medianamente densos de *Pinus patula-P. pseudostrobus-P. teocote* (v5) y Bosques de *Pinus montezumae-P. pseudostrobus* (v6), inicia ya en la faja de los 2900 m. La tercera ecorregión, también entre 2900 y poco más de 3100 m presenta bosques densos y puros de *Abies religiosa* (v7) sobre cañadas húmedas y terrenos con exposiciones de sombra geográfica (umbria). La cuarta ecorregión son bosques de *Abies-religiosa* spp. (v8) y Bosques de *Abies religiosa-Pinus hartwegii* (v9) entre 3200 y 3500 m. La quinta ecorregión de 3500 a menos de 3800 m es una faja que alterna bosque *Abies religiosa-Pinus hartwegii* (v10) y *Pinus hartwegii*-zacatonal montano (v11). A las unidades de paisaje v7 y v8 que se intercalan en el mismo intervalo altitudinal, las distingue una dominancia de *Abies religiosa* (v7) y su coexistencia con otras especies de Pino (v8). La ecorregión uno, ubicada bajo 2800 m muestra un mosaico edáfico con Andosols Silándicos vítricos/Regosols taptovítricos, Andosols úmbricos, Regosol dísticos/taptovítricos, Andosols mólicos/Regosols taptovítricos, Andosols mólicos y fluvisols dísticos que, aunque están en terrenos de pendiente moderada a suave, evidencian degradación y erosiones eólica e hídrica severas ante la marcada carencia de vegetación debida a cambio de uso de suelo y tala excesiva. La segunda ecorregión, presenta Andosols vítricos y úmbricos, Andosols mólicos, Cambisols húmicos y Fluvisols eútricos que no presentan erosión a pesar de pendientes que van de 4 a 35% gracias a la protección de la cubierta vegetal y altos contenidos de MOS. La tercera ecorregión presenta Regosol eútrico/Leptosol esquelético dístico y Andosols óricos y húmicos; son estas zonas donde, además de las fuertes pendientes del terreno, se tiene la mayor extracción de madera dejando expuestos a la erosión a los suelos. La cuarta ecorregión presenta Andosols vítrico-fulvico y Andosols vitricos y melánicos (Miehlich, 1980) ya en terrenos circundantes al polígono del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl. La quinta ecorregión en general presenta suelos incipientes (10 a 30 centímetros de espesor) Leptosol esquelético-dístico y Andosols eutrosílico/húmico (Miehlich, 19810).

Propiedades Físicas y Químicas de los Suelos

Los suelos de todas las eco-regiones presentaron densidades aparentes menores a 1 g cm^{-3} , texturas franco-arenosas y francas, alta porosidad, CGA de moderado a muy alto, baja conductividad eléctrica y reacción del suelo ácida en general y, ante un mayor desplazamiento del ion H^+ por el ion K^+ , acidez más baja en KCl 1N. La acidez de los suelos se acentúa al incrementar en altitud. Los altos valores de CGA en la mayoría de estos suelos, a pesar de sus altos porcentajes de arena, se explican por las grandes cantidades de MOS estabilizada en compuestos órgano-minerales. Respecto a la materia orgánica y N total del suelo, los contenidos son altos y aumentan al incrementar la altitud. Aunque en bajas concentraciones, excepto el calcio, las variaciones en contenido de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables muestran suelos de buena fertilidad, particularmente en suelos ubicados entre 2900 y 3400 m de altitud, no obstante, la baja disponibilidad de fósforo observable en la mayoría de los suelos (Cuadro 1).

Propiedades Bioquímicas y Biológicas de los Suelos

En terrenos ubicados de 2900 a 3400 m (bosques *Abies religiosa* y Bosques *Abies-Pinus* spp.), los suelos tuvieron mayor contenido de carbono en biomasa microbiana en concordancia a sus elevados contenidos de materia orgánica. Las fosfatasas del suelo, mostraron mayor actividad en suelos de sitios altos con cobertura de *Pinus hartwegii-Abies religiosa* y *Pinus hartwegii-Zacatonal* montano (v11). Respecto a la actividad de las fosfatasas en suelos de zonas bajas y en concordancia a la acidez edáfica, se encontraron valores 100% mayores en las fosfatasas ácidas, respecto a las alcalinas. Margalef *et al.* (2017), reportan, en 379 observaciones de fosfatasas ácidas y en 329 para las alcalinas, respuestas afines a los resultados de esta investigación. En referencia a las poblaciones microbianas del suelo, las bacterias se encontraron de abundantes a muy abundantes en todos los sitios. Aunque con menor abundancia que las bacterias, los hongos y actinomicetos también se encontraron en todos los suelos, mientras las algas del suelo, son poco abundantes en algunos sitios y totalmente ausentes en otros (Cuadro 2).

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas de los suelos de los sitios de estudio (0 a -0.2 m de profundidad del suelo).
Table 1. Physical and chemical soil properties of the Volcanoes Biosphere Reserve study sites (0 a -0.2 m of soil depth) in Mexico.

Altitud (η) m	Propiedades físicas								Propiedades químicas								
	pH 1:2		DA	CGA	EP	Arc.	Lim.	Are.	COS	COS	N-t	C:N N°	P-Disp.	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
	H ₂ O	KCl												Intercambiable			
	l N	g cm ⁻³	g g ⁻¹	- - - - -	%	- - - - -	Mg ha ⁻¹	-	g kg ⁻¹	-	mg kg ⁻¹	- - - -	cmol kg ⁻¹	- - - -			
2650 (v1)	6.1	4.3	1.3	0.13	47.5	6	14	80	25.4	13.1	0.4	33	12.2	0.1	0.2	7.2	0.2
2710 (v2)	6.2	4.9	0.9	0.52	57.2	16	26	58	31.7	16.4	0.8	21	4.1	1.8	1.2	12.8	3.9
2800 (v3)	6.2	4.6	1.3	0.21	49.5	4	20	76	23.4	12.2	0.5	24	8.9	1.0	0.5	9.2	0.6
2832 (v4)	6.4	5.17	1.2	0.32	39.6	4	8	88	57.9	28.9	0.8	36	5.6	5.0	0.2	9.6	0.9
2900 (v5)	6.3	5.1	1.1	0.18	57.0	6	28	66	36.4	18.8	2.2	9	7.5	0.1	0.4	9.6	0.5
2918 (v6)	6.4	4.9	1.0	0.37	62.9	8	16	76	24.3	12.5	1.8	7	11.9	2.2	1.0	11.0	1.8
2932 (v7)	6.8	5.8	1.0	0.36	54.5	10	24	66	27.5	17.4	1.9	9	23.7	1.7	0.6	28.0	2.7
2965 (v7)	6.5	5.2	0.9	0.25	62.7	6	18	76	49.7	33.8	3.1	11	4.4	3.3	0.4	11.0	3.1
3000 (v7)	6.3	4.9	0.9	0.47	63.7	8	26	66	92.6	62.2	2.2	28	7.3	1.5	0.4	21.0	1.0
3225 (v7)	6.2	4.9	1.0	0.35	33.1	4	14	82	67.2	40.4	0.5	81	5.6	0.7	0.4	23.0	1.2
3228 (v7)	6.4	5.7	1.0	0.68	61.1	8	20	72	128.6	82.0	2.3	36	8.9	1.8	0.38	39.5	2.4
3250 (v8)	6.7	5.9	0.9	0.43	58.8	6	22	72	45.9	23.8	2.4	10	24.1	2.7	0.5	41.0	3.9
3288 (v8)	5.9	4.6	1.0	0.25	51.7	8	18	74	65.3	33.8	1.7	20	8.1	2.5	0.2	6.4	1.3
3300 (v7)	6.5	5.6	1.0	0.17	51.9	6	22	72	59.6	37.6	0.9	42	5.2	0.9	0.37	25.0	1.2
3315 (v7)	5.9	4.9	1.0	0.36	52.4	8	28	64	163.2	96.2	3.3	29	7.0	1.1	1.0	33.0	2.0
3336 (v7)	5.9	4.7	1.0	0.73	51.0	6	20	74	167.8	96.2	2.4	40	6.7	1.9	0.3	29.0	2.3
3398 (v7)	6.4	5.2	1.0	0.34	54.2	6	18	76	85.3	50.8	2.1	24	14.8	0.6	31	18.4	1.3
3440 (v7)	6.2	5.2	0.9	0.35	41.2	2	20	78	74.9	46.3	1.6	29	13.0	1.8	0.6	21.6	1.3
3500 (v9)	5.4	4.0	1.0	0.45	58.1	6	20	74	169.3	123.0	3.0	41	5.0	2.1	0.3	13.1	0.9
3520 (v9)	6.0	4.7	1.03	0.42	57.3	6	20	74	99.0	61.9	2.1	29	9.7	0.6	0.4	13.1	1.3
3522 (v9)	5.4	3.9	1.1	0.23	57.7	12	20	68	43.8	22.7	1.9	12	10.0	2.5	0.2	5.7	0.6
3550 (v10)	5.4	4.2	1.0	0.21	50.3	6	24	70	126.5	65.4	2.2	30	8.9	1.0	0.3	8.2	0.8
3550 (v10)	5.4	4.2	0.86	0.21	50.3	6	24	70	115.1	65.4	2.2	30	8.9	1.0	0.3	8.2	0.8
3585 (v10)	6.0	4.7	0.9	0.42	57.3	6	20	74	119.6	61.9	2.1	29	9.7	0.6	0.4	13.1	1.3
3600 (v11)	5.4	4.0	1.33	0.45	58.1	6	20	74	237.8	123.0	3.0	41	5.0	2.1	0.3	13.1	0.9
3723 (v11)	6.0	4.4	0.93	0.40	60.9	4	20	76	137.2	71.0	2.5	28	12.0	0.5	0.3	10.6	0.9

En la columna del piso altitudinal: (v1) = vegetación secundaria-Bosque *Pinus montezumae-Quercus* spp.-*Alnus* spp.; (v2) = vegetación secundaria-Bosque *Pinus teocote-Cupressus* spp.; (v3) = vegetación secundaria-Bosque *Pinus* spp.-*Abies religiosa*; (v4) = bosques *Abies-Cupressus*; (v5) = bosque *Pinus patula-P. pseudostrobus-P. teocote*; (v6) = bosques *Pinus montezumae-P. pseudostrobus*; (v7) = bosques *Abies religiosa*; (v8) = bosques *Abies-Pinus* spp.; (v9) = bosques *Abies religiosa-Pinus hartwegii*; (v10) = bosque *Pinus hartwegii-Abies religiosa*; (v11) = *Pinus hartwegii-Zacatonal* montano. DA = densidad aparente; CGA = contenido gravimétrico de agua; EP = espacio poroso; Arc. = arcillas; Lim. = limos; Are. = arenas; COS = carbono orgánico del suelo; N-t = nitrógeno total; C:N = relación carbono:nitrógeno; P-Disp. = fósforo disponible.

In altitude column: (v1) = secondary vegetation and *Pinus montezumae-Quercus* spp.-*Alnus* spp. forest; (v2) = secondary vegetation and *Pinus teocote-Cupressus* spp. forest; (v3) = secondary vegetation and *Pinus* spp.-*Abies religiosa* forest; (v4) = *Abies-Cupressus* forest; (v5) = *Pinus patula-P. pseudostrobus-P. teocote* forest; (v6) = *Pinus montezumae-P. pseudostrobus* forest; (v7) = *Abies religiosa* forest; (v8) = *Abies-Pinus* spp. forest; (v9) = *Abies religiosa-Pinus hartwegii* forest; (v10) = *Pinus hartwegii-Abies religiosa* forest; (v11) = *Pinus hartwegii-Montane* grass. DA = bulk density; CGA = gravimetric water content; EP = porous space; Arc. = clays; Lim. = slimes; Are. = sand; COS = soil organic carbon; N-t = total nitrogen; C:N = carbon:nitrogen ratio; P-Disp. = available phosphorus.

Cuadro 2. Propiedades bioquímicas y biológicas del suelo en los sitios estudiados (0 a -0.1 m de profundidad del suelo).
Table 2. Biochemical and biological soil properties in the Volcanoes Biosphere Reserve study sites (0 a -0.1 m of soil depth) in Mexico.

Altitud	Propiedades Bioquímicas				Propiedades Biológicas			
	CO ₂	CBM	Fosfatasa		Bacterias	Hongos	Actinomicetos	Algas
			pH ₅	pH ₁₁				
m	g kg ⁻¹ suelo día ⁻¹	g kg ⁻¹ suelo	mg p-NP kg ⁻¹ h ⁻¹		- - - - - Abundancia relativa [†] - - - - -			
2650 (v1)	5.50 × 10 ⁻³	2.04 × 10 ⁻²	0.032	0.016	2	1	2	0
2710 (v2)	5.00 × 10 ⁻³	1.55 × 10 ⁻²	0.035	0.018	3	3	1	1
2800 (v3)	4.10 × 10 ⁻³	1.29 × 10 ⁻²	0.026	0.014	2	2	1	1
2832 (v4)	5.96 × 10 ⁻³	14.9 × 10 ⁻²	0.040	0.013	1	2	1	0
2900 (v5)	4.60 × 10 ⁻³	8.06 × 10 ⁻³	0.027	0.017	2	2	1	0
2918 (v6)	3.90 × 10 ⁻³	1.61 × 10 ⁻²	0.025	0.016	2	2	1	0
2932 (v7)	13.9 × 10 ⁻³	9.60 × 10 ⁻²	0.027	0.015	2	2	1	0
2965 (v7)	14.0 × 10 ⁻³	7.50 × 10 ⁻²	0.050	0.020	3	2	1	1
3000 (v7)	5.80 × 10 ⁻³	36.5 × 10 ⁻²	0.037	0.018	2	2	1	0
3225 (v7)	17.8 × 10 ⁻³	11.6 × 10 ⁻²	0.030	0.012	2	2	1	2
3228 (v7)	13.5 × 10 ⁻³	14.9 × 10 ⁻²	0.030	0.013	3	2	1	0
3250 (v8)	15.2 × 10 ⁻³	1.71 × 10 ⁻²	0.027	0.013	3	3	3	1
3288 (v8)	3.94 × 10 ⁻³	7.44 × 10 ⁻³	0.027	0.012	3	3	2	1
3300 (v7)	4.80 × 10 ⁻³	60.1 × 10 ⁻²	0.027	0.014	1	1	1	0
3315 (v7)	9.10 × 10 ⁻³	14.3 × 10 ⁻²	0.038	0.017	2	1	1	0
3336 (v7)	9.39 × 10 ⁻³	13.6 × 10 ⁻³	0.041	0.015	2	2	2	0
3398 (v7)	9.80 × 10 ⁻³	8.80 × 10 ⁻²	0.046	0.017	2	2	2	0
3440 (v7)	5.90 × 10 ⁻³	16.7 × 10 ⁻²	0.041	0.011	2	1	1	0
3500 (v9)	6.50 × 10 ⁻³	27.0 × 10 ⁻²	0.051	0.016	2	2	1	1
3520 (v9)	6.30 × 10 ⁻³	34.3 × 10 ⁻²	0.032	0.016	2	1	1	0
3522 (v9)	2.38 × 10 ⁻³	1.04 × 10 ⁻²	0.029	0.014	2	2	1	1
3550 (v10)	8.30 × 10 ⁻³	1.44 × 10 ⁻²	0.031	0.015	2	2	1	1
3550 (v10)	5.44 × 10 ⁻³	1.86 × 10 ⁻²	0.032	0.015	2	1	2	0
3585 (v10)	4.13 × 10 ⁻³	8.81 × 10 ⁻²	0.032	0.016	2	1	1	0
3600 (v11)	4.25 × 10 ⁻³	1.48 × 10 ⁻²	0.051	0.015	2	2	1	1
3723 (v11)	4.75 × 10 ⁻³	7.31 × 10 ⁻³	0.039	0.013	3	2	1	0

En la columna del piso altitudinal: (v1) = vegetación secundaria-Bosque *Pinus montezumae-Quercus* spp.-*Alnus* spp.; (v2) = vegetación secundaria-Bosque *Pinus teocote-Cupressus* spp.; (v3) = vegetación secundaria-Bosque *Pinus* spp.-*Abies religiosa*; (v4) = bosques *Abies-Cupressus*; (v5) = bosque *Pinus patula-P. pseudostrobus-P. teocote*; (v6) = bosques *Pinus montezumae-P. pseudostrobus*; (v7) = bosques *Abies religiosa*; (v8) = bosques *Abies-Pinus* spp.; (v9) = bosques *Abies religiosa-Pinus hartwegii*; (v10) = bosque *Pinus hartwegii-Abies religiosa*; (v11) = *Pinus hartwegii-Zacatonal* montano. CBM = carbono en biomasa microbiana; Fosfatasa(pH5) = fosfatasa ácida; Fosfatasa(pH11) = fosfatasa alcalina. † Escala: ausentes = 0; presentes = 1; abundantes = 2; muy abundantes = 3 (ver texto).

In altitude column: (v1) = secondary vegetation and *Pinus montezumae-Quercus* spp.-*Alnus* spp. forest; (v2) = secondary vegetation and *Pinus teocote-Cupressus* spp. forest; (v3) = secondary vegetation and *Pinus* spp.-*Abies religiosa* forest; (v4) = *Abies-Cupressus* forest; (v5) = *Pinus patula-P. pseudostrobus-P. teocote* forest; (v6) = *Pinus montezumae-P. pseudostrobus* forest; (v7) = *Abies religiosa* forest; (v8) = *Abies-Pinus* spp. forest; (v9) = *Abies religiosa-Pinus hartwegii* forest; (v10) = *Pinus hartwegii-Abies religiosa* forest; (v11) = *Pinus hartwegii-Montane* grass. CBM = microbial biomass carbon; Phosphatase(pH5) = acid phosphatase; Phosphatase(pH11) = alkaline phosphatase. † Scale: absent = 0; present = 1; abundant = 2; very abundant = 3 (see text).

Indicadores y Valor de Calidad Total del Suelo

El análisis estadístico de componentes principales (ACP) de cada grupo de variables originales (VO), definió indicadores parciales de calidad del suelo (IpCS). El Cuadro 3 muestra tres componentes principales para propiedades físicas (I_{físicos}CS), tres para las químicas (I_{químicos}CS), dos componentes principales para propiedades bioquímicas (I_{bioquímicos}CS) y dos componentes principales para las propiedades biológicas (I_{biológicos}CS).

Los componentes principales que se asumen como variables robustas (VR) por su mayor influencia en la variabilidad del sistema fueron: a) contenido gravimétrico de agua, pH activo, porcentaje de arena; b) contenidos de C-orgánico y de Mg⁺² y Ca⁺² intercambiables; c) abundancias relativas de bacterias y algas y d) contenidos de C en biomasa microbiana y actividad de las fosfatasa ácidas.

Dado que el primer componente principal de cada grupo contribuye con mayor porcentaje en la variabilidad del sistema (para éste caso, calidad del suelo), se desarrolló con ellos las ecuaciones 1 a 4 para determinar por cada grupo de propiedades el valor parcial de calidad de suelo utilizando solo los valores del primer componente principal previamente estandarizados mediante una sustracción de la media a cada dato original y dividiendo esa diferencia entre su desviación estándar (columna uno de cada grupo en Cuadro 4).

$$I_{físicos}CS = (0.43 \times CGA) + (0.20 \times pHa) + (0.32 \times pHp) + (0.34 \times CE) - (0.41 \times DA) - (0.19 \times DR) + (0.38 \times \%EP) + (0.23 \times \%Arc) + (0.25 \times \%Lim) - (0.31 \times \%Are) \quad (1)$$

$$I_{químicos}CS = (0.40 \times COS) + (0.32 \times C:N) + (0.31 \times N-t) - (0.09 \times P-Disp) - (0.01 \times Na-int.) - (0.20 \times K-int) + (0.01 \times Ca-int) - (0.12 \times Mg-int) \quad (2)$$

$$I_{biológicos}CS = (0.64 \times Bact) + (0.63 \times Hon) + (0.40 \times Act) + (0.21 \times Alg) \quad (3)$$

$$I_{bioquímicos}CS = (0.52 \times CO_2) - (0.64 \times CBM) - (0.24 \times Fas5) - (0.51 \times Fas11) \quad (4)$$

El Cuadro 5 muestra los valores de calidad del suelo parciales originales obtenidos al desarrollar las ecuaciones indicadas para cada grupo de propiedades del suelo en cada sitio de estudio, los de menor magnitud (algunos de signo negativo), corresponden a suelos dedicados a la agricultura, pastoreo y suelos bajo vegetación secundaria y bosques mixtos fragmentados de *Pinus montezumae*, *Quercus* spp., *Alnus* spp. y de *Pinus teocote-Cupresus* spp. (v1 y v2) ubicados sobre la cota de 2650 m de altitud.

Dada la obtención de valores negativos en las escalas de valores parciales de calidad edáfica (IpCS), se realizó en estos y en cada grupo de propiedades, un ajuste mediante la adición del valor absoluto más bajo para asignar el valor “cero” a suelos de la menor calidad sin modificar la magnitud de las diferencias de calidad del suelo. El ajuste referido en los valores de IpCS se presenta en el Cuadro 5 como valores ajustados y con ellos, se calculó la calidad total del suelo en forma aditiva (CST_{sum}; Johnson, 2000) y en forma multiplicativa (CST_{mul}; Doran y Parkin, 1994). El Cuadro 5 también presenta los valores de CST_{sum} y CST_{mul} que se presentan ordenados en forma descendente, de manera que los mayores valores de

Cuadro 3. Análisis de Componentes Principales (ACP). Solo se muestran los que tienen eigenvalor mayor a uno.
Table 3. Principal Components Analysis (ACP). Are showing, only those with eigenvalue greater than one.

	Propiedades									
	Físicas			Químicas			Biológicas		Bioquímicas	
Número de componente	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2
Eigenvalor	3.73	2.47	1.72	5.98	2.82	1.46	1.960	1.001	1.93	1.05
Porcentaje de varianza	37.3	2.47	17.2	49.9	23.5	12.2	49.0	25.0	48.3	23.8
Porcentaje acumulativo	37.3	62.0	79.2	49.9	73.4	85.6	49.0	74.0	48.3	72.1

Cuadro 4. Ponderación de componentes principales para las propiedades físicas, químicas, biológicas y bioquímicas del suelo.
Table 4. Weighting of principal components for physical, chemical, biological and biochemical soil properties in the Volcanoes Biosphere Reserve, Mexico.

Componentes principales	Propiedades												
	Físicas			Químicas			Biológicas		Bioquímicas				
	1	2	3		1	2	3	1	2		1	2	
CGA	0.43	-0.09	-0.29	COS	0.40	0.01	0.11	Bact.	0.64	-0.32	CO ₂	0.52	0.17
pHa	0.20	0.54	0.15	C:N	0.32	-0.17	0.29	Hon.	0.63	-0.04	CBM	-0.64	-0.06
pHp	0.32	0.45	0.16	N-tot	0.31	0.01	0.11	Act.	0.40	0.08	FAS ₅	-0.24	0.96
CE	0.34	0.37	-0.09	P-Disp	-0.09	0.30	-0.20	Alg.	0.21	0.95	FAS ₁₁	-0.51	-0.21
DA	-0.41	0.21	0.35	Na-i	-0.01	0.40	-0.43						
DR	-0.19	0.35	0.26	K-i	-0.20	0.36	0.20						
%EP	0.38	0.02	-0.24	Ca-i	0.01	0.15	0.58						
%Arc.	0.23	-0.31	0.31	Mg-i	-0.12	0.54	-0.01						
%Lim.	0.25	-0.14	0.50										
%Are.	-0.31	0.28	-0.52										

CGA = contenido gravimétrico de agua; pHa y pHp = pH activo y potencial; CE = conductividad eléctrica; DA y DR = densidades aparente y real; %EP = porcentaje de espacio poroso; %Arc. = porcentaje de arcilla; %Lim. = porcentaje de limo; %Are. = porcentaje de arena; COS = carbono orgánico; C:N = razón carbono/nitrógeno; N-tot = N-total; P-Disp = fósforo disponible; Na-i, K-i, Ca-i y Mg-i = sodio, potasio, calcio y magnesio intercambiables; Bact. = bacterias; Hon. = hongos; Act. = actinomicetos; Alg. = algas; CO₂ = producción potencial de dióxido de carbono; CBM = carbono en biomasa microbiana; FAS₅ = fosfatasas ácidas; FAS₁₁ = fosfatasas alcalinas.

CGA = gravimetric water content; pHa and pHp = active and potential pH; CE = electrical conductivity; DA and DR = apparent and real densities; %EP = porous space percentage; %Arc. = clay percentage; %Lim. = silt percentage; %Are. = sand percentage; COS = soil organic carbon; C:N = carbon/nitrogen ratio; N-tot = N-total; P = available phosphorus; Na-i, K-i, Ca-i and Mg-i = sodium, potassium, calcium and magnesium exchangeables; Bact. = bacteria; Hon. = fungi; Act. = actinomycetes; Alg. = algae; CO₂ = carbon dioxide potential production; CBM = microbial biomass carbon; FAS₅ = acid phosphatases; FAS₁₁ = alkaline phosphatases.

calidad de suelo total obtenidos tanto por CST_{sum} como por CST_{mul} , se presentan en sitios con bosques de *Abies religiosa* (Kunth Schltl. et Cham.) (v7) y de Bosques de *Abies-Pinus* spp. y *Pinus montezumae* Lamb., *P. pseudostrobus* Lindl. (v8) sobre suelos que Miehlich (1980), clasificó como Andosol húmico, Andosols vítrico-fúlvico y Andosols vítricos y melánicos. Al otro extremo de la escala, los sitios de menor calidad del suelo total están por la cota de 2650 m de altitud, cuya vegetación secundaria y el bosque mixto de *Pinus montezumae-Quercus* spp. y de *Pinus* spp.-*Alnus* spp. se distribuye en valles y lomeríos suaves con Andosols úmbricos, Andosols silándicos vítricos/Regosols taptovítricos, Andosols mólicos/Regosols taptoándico eutrosílicos, Regosol dísticos/taptovítricos y fluvisols dísticos. Existe absoluta coincidencia entre los sitios cuyos mayores y menores valores de calidad del suelo total se obtuvieron en los dos modelos o formas de

calcularlos (CST_{sum} y CST_{mul}). También se observa la fuerte influencia de los $I_{físicos}^{CS}$, $I_{bioquímicos}^{CS}$ y $I_{biológicos}^{CS}$ sobre el más alto valor de CST a 3250 y 3288 m, lo que refleja buena condición edáfica entre 2900 y 3250 m con excepción del sitio conocido como Cuchilla Zumpango (3300 m) con fuerte daño por tala excesiva y erosión del suelo que impactaron a los $I_{bioquímicos}^{CS}$ y $I_{biológicos}^{CS}$ que presentaron en esta altitud los más bajos valores. Las evidencias de la mala calidad del suelo encontrada para los sitios que la tienen, muestra que los bajos valores están asociados a marcadas perturbaciones por tala y fuerte extracción de recursos forestales, pues es notorio que en los sitios más accesibles a actividades productivas y turísticas son los de menor calidad del suelo total (Cuadro 5).

Debido a su influencia en procesos vinculados con su fertilidad, los indicadores de calidad edáfica encontrados son adecuados, el pH influye en

Cuadro 5. Valores parciales de calidad del suelo por grupo de propiedades y valores totales por sitio estudiado.
Table 5. Partial soil quality values by groups of soil properties and total soil quality values by studied sites in the Volcanoes Biosphere Reserve, Mexico.

Altitud / Condición	Índices parciales de calidad del suelo								Calidad total del suelo			
	I _{físicos} CS		I _{químicos} CS		I _{bioquímicos} CS		I _{biológicos} CS		Altitud / Condición	CST _{sum} †	Altitud / Condición	CST _{mul} †
	Original	Ajustado	Original	Ajustado	Original	Ajustado	Original	Ajustado				
m									m		m	
2650 (v1)	-2.30	1.65	-4.97	0.00	-2.28	0.76	0.49	4.67	3250 (v8)	30.84	3250 (v8)	3440.86
2710 (v2)	3.46	7.41	0.95	5.92	-1.24	1.80	2.05	6.23	3228 (v7)	25.96	3228 (v7)	1491.54
2800 (v3)	-0.21	3.74	-3.73	1.24	-0.51	2.53	0.59	4.77	2932 (v7)	23.39	2932 (v7)	1010.36
2832 (v4)	-3.95	0.00	-0.85	4.12	0.07	3.11	-0.74	3.44	3336 (v7)	22.92	3336 (v7)	976.44
2900 (v5)	3.44	7.39	-2.70	2.27	-0.83	2.21	-1.62	2.56	2965 (v7)	21.44	2710 (v2)	493.19
2918 (v6)	1.42	5.37	-0.72	4.25	-1.88	1.16	-1.62	2.56	2710 (v2)	21.37	2965 (v7)	316.06
2932 (v7)	0.74	4.69	3.84	8.81	2.07	5.11	0.61	4.79	3550 (v10)	21.33	3315 (v7)	309.30
2965 (v7)	0.78	4.73	3.26	8.23	-1.94	1.10	3.20	7.38	3600 (v11)	21.06	3723 (v11)	301.74
3000 (v7)	3.57	7.52	-1.11	3.86	0.07	3.11	-1.50	2.68	3315 (v7)	18.71	3000 (v7)	241.69
3225 (v7)	-2.63	1.32	-3.66	1.31	-0.53	2.51	1.16	5.34	3723 (v11)	17.76	3398 (v7)	218.02
3228 (v7)	4.98	8.93	2.66	7.63	2.07	5.11	0.10	4.28	3000 (v7)	17.17	3288 (v8)	157.20
3250 (v8)	5.15	9.10	2.57	7.54	3.54	6.58	3.45	7.63	3398 (v7)	15.91	3500 (v9)	152.08
3288 (v8)	-2.03	1.92	-0.72	4.25	1.03	4.07	0.54	4.72	3585 (v10)	15.32	3585 (v10)	137.36
3300 (v7)	-3.08	0.87	3.09	8.06	-3.04	0.00	-4.18	0.00	3288 (v8)	14.97	2900 (v5)	95.34
3315 (v7)	0.08	4.03	2.76	7.73	-1.03	2.01	0.76	4.94	2900 (v5)	14.44	3520 (v9)	88.67
3336 (v7)	2.51	6.46	1.80	6.77	0.73	3.77	1.74	5.92	3500 (v9)	14.19	3550 (v10)	74.27
3398 (v7)	-0.17	3.78	-2.17	2.80	0.55	3.59	1.57	5.75	2918 (v6)	13.35	2918 (v6)	68.05
3440 (v7)	-2.36	1.59	-0.83	4.14	-1.03	2.01	-0.91	3.27	3550 (v10)	13.03	3600 (v11)	67.29
3500 (v9)	-0.50	3.45	-0.86	4.11	-0.23	2.81	-0.35	3.83	3520 (v9)	13.00	3522 (v9)	63.52
3520 (v9)	1.00	4.95	-2.42	2.55	-1.03	2.01	-0.69	3.49	2800 (v3)	12.28	2800 (v3)	55.92
3522 (v9)	-2.17	1.78	-2.00	2.97	-0.52	2.52	0.59	4.77	3522 (v9)	12.04	3440 (v7)	43.23
3550 (v10)	-1.84	2.11	-3.60	1.37	-0.55	2.49	-1.71	2.47	3440 (v7)	11.00	3225 (v7)	23.05
3550 (v10)	-1.99	1.96	1.15	6.12	-0.58	2.46	-1.84	2.34	2832 (v4)	10.67	3550 (v10)	16.45
3585 (v10)	0.25	4.20	1.54	6.51	-0.20	2.84	-2.41	1.77	3225 (v7)	10.47	2832 (v4)	0.00
3600 (v11)	-3.68	0.27	6.93	11.90	1.35	4.39	0.59	4.77	3300 (v7)	8.93	3300 (v7)	0.00
3723 (v11)	-1.22	2.73	1.68	6.65	2.11	5.15	-0.96	3.22	2650 (v1)	7.08	2650 (v1)	0.00

Valores parciales de calidad de suelo por cada grupo de propiedades y calidad del suelo total evaluada con un modelo aditivo (CST_{sum}) y Conmutativo (CST_{mul}). †Sitios ordenados de manera decreciente respecto a su calidad del suelo.
 Partial soil quality values for each group of soil properties and total soil quality evaluated with additive (CST_{sum}) and commutative (CST_{mul}) models. †Sites in decreasing order with respect to their soil quality.

disponibilidad de nutrientes, solubilidad de tóxicos y en la distribución de la vegetación (Neina, 2019; Baar y Roelofs, 2002; Acevedo-Sandoval *et al.*, 2008). También se conocen los efectos favorables del porcentaje de arena (hasta cierto nivel) para mejorar y aumentar la infiltración del agua (Kelting *et al.*, 1999; Rabot *et al.*, 2018). Los contenidos de carbono orgánico y cationes intercambiables ya han sido documentados ampliamente como indicadores de calidad edáfica (Pennock y van Kessel, 1997; Bautista *et al.*, 2004; Jassal *et al.*, 2004; Delelegn *et al.*, 2017). Esta investigación mostró que los contenidos de COS en suelos degradados tienen entre 20 y 200 Mg C ha⁻¹ menos que los de buena calidad, resultados similares fueron reportados por Sun *et al.* (2015). Además de lo anterior, los resultados de este trabajo confirman que en los suelos que mostraron altos valores de calidad (altitud de 3250 m), el calcio y el potasio intercambiables fueron entre dos y casi cuatro veces más altos que en los suelos de calidad baja (2650 m de altitud). Todos estos resultados confirman que éstos suelos, derivados de ceniza volcánica, tienen buenos niveles de fertilidad (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2008) aunque las tasas de retorno de nutrientes liberados del mantillo mediante la mineralización pueden variar a consecuencia de la vegetación natural que presentan (Tamayo-Vélez y Osorio, 2018). La descomposición de la materia orgánica del suelo y la oportuna liberación de nutrientes se vinculan con los contenidos de C en biomasa microbiana (CBM), lo que hace de éste parámetro un buen indicador de calidad del suelo (Epron *et al.*, 1999; Jassal *et al.*, 2004; Bijayalaxmi y Yadava, 2006; Shi *et al.*, 2006). Ante la generalizada acidez de los suelos,

entre moderada a fuerte aunada a los elevados contenidos de materia orgánica, utilizados como sustrato, también destaca, como indicador de calidad del suelo la actividad de las fosfatasa ácidas que es dominante sobre la de las alcalinas y por su capacidad hidrolítica para incrementar el fósforo disponible en suelos caracterizados por fijarlo químicamente en minerales amorfos.

Los análisis de correlación entre indicadores parciales de calidad del suelo con los valores de calidad total del suelo mostraron que el modelo aditivo (CST_{sum}) tiene mayor número de correlaciones significativas ($P < 0.05$) y altamente significativas ($P < 0.01$) respecto al número de correlaciones encontradas entre los IpCS con los valores de CST_{mul}. Si bien, el contenido de carbono no muestra significancia en los valores de CST, su efecto indirecto en el CGA y en las poblaciones de bacterias del suelo si se destaca, lo mismo que el Ca y K intercambiables en forma significativa con las con la CST (Cuadro 6).

Los suelos con mayores valores de calidad total (tanto la CST_{mul} como la CST_{sum}) que se encontraron en los macizos forestales distribuidos entre 2900 y 3250 m, tuvieron acidez moderada y, aunque tienen salinidad casi despreciable, según la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), también tuvieron mayor conductividad eléctrica, mayores valores de Ca⁺² y K⁺ intercambiables, de contenidos gravimétricos de agua y tuvieron los más bajos porcentajes de arena en comparación con otros suelos de la toposecuencia. Es de destacar que la calidad de los suelos total más alta se asocia tanto a sus altos contenidos de carbono orgánico y nitrógeno total como a su mayor disponibilidad de P que

Cuadro 6. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre variables robustas con los valores de CST_{sum} y CST_{mul}.
Table 6. Pearson correlation coefficients (r) between robust variables with values of CST_{sum} and CST_{mul}.

	Variables robustas. Indicadores de calidad del suelo derivadas del ACP										
	COS	N-total	CGA	Arena	pH	Mg	Ca	Bacterias	Algas	CBM	Facid
CST _{sum}	0.24	0.26	0.74	-0.33	0.34	0.80	0.89	0.62	0.23	0.03	0.24
	ns	ns	**	ns	ns	**	**	*	ns	ns	ns
CST _{mul}	-0.15	0.09	0.32	-0.05	0.54	0.69	0.92	0.50	0.31	0.25	-0.20
	ns	ns	ns	ns	ns	*	**	ns	ns	ns	ns

ns = no significativo; * = $P < 0.05$; ** = $P < 0.01$. COS = carbono orgánico del suelo; N-total = nitrógeno total; Ca = calcio intercambiable; Mg = magnesio intercambiable; CBM = carbono en biomasa microbiana; Facid = actividad fosfatasa ácida.

ns = not significant; * = $P < 0.05$; ** = $P < 0.01$. COS = soil organic carbon; N-total = total nitrogen; Ca = exchangeable calcium; Mg = exchangeable magnesium; CBM = microbial biomass carbon; Facid = acid phosphatase activity.

se relaciona muy bien con la alta abundancia relativa de bacterias, hongos y actinomicetos, lo cual también fue señalado por Khan y Joergensen (2012) al encontrar alta asociación entre el fósforo disponible y las poblaciones microbianas del suelo. Por el contrario, en altitudes que rondan los 2650 m bajo bosques fragmentados con vegetación secundaria, en terrenos semi-abandonados o dedicados a la agricultura y la ganadería, los suelos presentaron los más bajos valores totales de calidad de suelo (CST_{mul} y CST_{sum}) dado el empobrecimiento que presentan respecto a los contenidos de carbono orgánico y nitrógeno-total. Los suelos de estos sitios que han sido sometidos a fuerte presión antrópica, han sufrido pérdidas de biomasa microbiana, asociadas también a pérdidas tanto de materia orgánica, como de Ca^{+2} y K^{+} -intercambiables, lo que muestra un empobrecimiento en su fertilidad edáfica y consecuentes pérdidas de su multifuncionalidad como también ha sido señalado por Chan *et al.* (2001), Doran y Parkin (1994) y Muñoz-Rojas (2018).

CONCLUSIONES

- La descripción y análisis de las propiedades físicas, químicas, bioquímicas y biológicas en grupos separados y la utilización del análisis de componentes principales han permitido la identificación de adecuados indicadores parciales de calidad del suelo, con un modelo aditivo, los cuales permiten la determinación de los valores de calidad total del suelo con mayor grado de certidumbre que la que se obtiene con el uso de un modelo conmutativo.
- Las variables encontradas como indicadores de calidad del suelo son causadas por el cambio de uso de la tierra, son muy sensibles a la erosión del suelo superficial que en sitios degradados muestra pérdidas superiores a 150 Mg C ha^{-1} afectando todas las bondades que la MOS proporciona a este entre ellas disminuyendo la fertilidad del suelo.
- Los sitios cuyo paisaje presenta individuos del género *Abies*, conjugan valores de sus $IpCS$ que les dan mayor calidad de suelo total ($v2$, $v7$ y $v8$), mientras que en los bosques donde predominan especies del género *Pinus*, la mayor calidad se encontró en suelos bajo *Pinus hartwegii* ($v10$ y $v11$)
- El protocolo propuesto para determinar y asignación los valores de calidad del suelo y para hacer la comparación entre diversos suelos, permite identificar patrones de variabilidad en la calidad del suelo bajo

vegetación natural a lo largo del gradiente altitudinal, mismo que influye sobre otros gradientes como el de contenido gravimétrico de agua del suelo, de carbono orgánico y en biomasa microbiana así como también de las variaciones de las condiciones de temperatura y humedad que, de hecho, influyen en la actividad de exoenzimas como las fosfatasa del suelo.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual, son propiedad de la Línea de Investigación Relaciones Suelo-Agua-Planta en el Manejo de Cuencas de la Unidad Multidisciplinaria de Investigación Experimental Zaragoza y están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

Se contó con el financiamiento y apoyo de los proyectos PAPIT-IN22840, DGAPA UNAM; PAPIME-PE 215016, DGAPA UNAM y el apoyo de la Carrera de Biología y de la División de Estudios de Investigación y Posgrado de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza de la UNAM.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: Gerardo Cruz Flores, Eloisa A. Guerra Hernández y Juan M. Valderrábano Gómez. Metodología: Gerardo Cruz Flores, Eloisa A. Guerra Hernández, Juan M. Valderrábano Gómez y Julio Campo Alves. Software: Gerardo Cruz Flores, Eloisa A. Guerra Hernández y Juan M. Valderrábano Gómez.

Validación: Gerardo Cruz Flores y Juan M. Valderrábano Gómez. Análisis formal: Gerardo Cruz Flores, Eloisa A. Guerra Hernández y Juan M. Valderrábano Gómez. Metodología: Gerardo Cruz Flores, Eloisa A. Guerra Hernández, Juan M. Valderrábano Gómez y Julio Campo Alves; investigación: Gerardo Cruz Flores, Eloisa A. Guerra Hernández y Juan M. Valderrábano Gómez. Metodología: Gerardo Cruz Flores y Julio Campo Alves. Recursos: Gerardo Cruz Flores, Eloisa A. Guerra Hernández. Curación de datos: Juan M. Valderrábano Gómez. Escritura, preparación del borrador original: Gerardo Cruz Flores y Julio Campo Alves. Visualización: Gerardo Cruz Flores, Eloisa A. Guerra Hernández. Supervisión: Gerardo Cruz Flores. Administración del proyecto: Gerardo Cruz Flores y Eloisa A. Guerra Hernández. Adquisición de fondos: Gerardo Cruz Flores y Eloisa A. Guerra Hernández.

AGRADECIMIENTOS

A los estudiantes participantes de los programas de servicio social y de las asignaturas de los Laboratorios Integrales de Biología y de Investigación Formativa del Ciclo Terminal de la Carrera de Biología de la FES Zaragoza de la Universidad Nacional Autónoma de México, a DGAPA-UNAM: PAPIIME PE 215016 y PAPIIT-IN22840.

LITERATURA CITADA

- Acevedo-Sandoval, O., F. Prieto-García y A. Gordillo-Martínez. 2008. Identificar las fracciones de aluminio en un Andosol del estado de Hidalgo, México. *Rev. Soc. Geol. Esp.* 21: 125-132.
- Armenise, E., M. A. Redmile-Gordon., M. A. Stellacci., A. Ciccarese, and P. Rubino. 2013. Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. *Soil Tillage Res.* 130: 91-98. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.02.013>.
- Arriaga, L., J. M. Espinoza, C. Aguilar, E. Martínez, L. Gómez y E. Loa. 2000. Regiones Terrestres prioritarias de México. <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/terrestres.html> (Consulta: agosto 03, 2017).
- Atlas, R. M., R. Bartha, and D. Atlas. 1998. *Microbial ecology: Fundamentals and applications*. Benjamin/ Cummings. Menlo Park, CA, USA. ISBN: 0805306552.
- Baar, J. and G. M. Roelofs. 2002. Distribution of plants species in relation to pH of soil and water. pp. 405-425. *In: Z. Rengel (ed.). Handbook of plant growth. pH as the master variable*. CRC Press. New York, NY, USA. ISBN: 9780367447076.
- Bautista-Cruz, A., J. Etchevers-Barra, R. F. del Castillo y C. Gutiérrez. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13: 90-97.
- Bai, Y., S. Chen, S. Shi, M. Qi, X. Liu, H. Wang, Y. Wang, and Ch. Jiang. 2020. Effects of different management approaches on the stoichiometric characteristics of soil C, N, and P in a mature Chinese fir plantation. *Sci. Total Environ.* 723: 137868. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137868>.
- Becerra E., M. G. 2018. De Parque Nacional a Reserva de la Biosfera. *Historia biocultural de la Sierra Nevada de México*. Editorial Académica Española. ISBN-10: 620224500X.
- Bijayalaxmi-Devi, N. and P. S. Yadava. 2006. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, North-east India. *Appl. Soil Ecol.* 31: 220-227. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.05.005>.
- Chan, K. Y., A. Bowman, and A. Oates. 2001. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an oxyc paleustalf under different pasture ley. *Soil Sci.* 166: 61-67. doi: <https://doi.org/10.1097/00010694-200101000-00009>.
- Delelegn, Y. T., W. Purahong, A. Blazevic, B. Yitafaru, T. Wubet, H. Göransson, and D. L. Godbold. 2017. Changes in the land use alter soil quality and aggregate stability in the highlands of northern Ethiopia. *Sci. Rep.* 7: 13602; 1-12. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14128-y>.
- Doran, J. W. and T. B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. pp. 1-21. *In: J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, and B. A. Stewart (eds.). Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA-ASA. Madison, WI, USA. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>. Online ISBN: 9780891189305.
- Epron, D., L. Farque, E. Lucot, and P. M. Badot. 1999. Soil CO₂ efflux in a beech forest: Dependence on soil temperature and soil water content. *Ann. For. Sci.* 56: 221-226.
- Ferrari, L., T. Orozco-Esquivel, V. Manea, and M. Manea. 2012. The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics* 522-523: 122-149. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.09.018>.
- Gaia-Gomes, J. H., M. G. Pereira, M. R. Francelino, and J. P. B. Larangeira. 2020. Physical and chemical attributes of soil on gully erosion in the Atlantic forest biome. *Rev. Ambient. Agua* 15: e2459. doi: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2459>.
- Giacometti, C., M. S. Demyan, L. Cavani, C. Marzadori, C. Ciavatta, and E. Kandeler. 2013. Chemical and microbiological soil quality indicators and their potential to differentiate fertilization regimes in temperate agroecosystems. *Appl. Soil Ecol.* 64: 32-48. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.10.002>.
- Jassal, R. S., T. A. Black, G. B. Drewitt, M. D. Novak, D. Gaumont, and Z. Nescic. 2004. A model of the production and transport of CO₂ in soil: Predicting soil CO₂ concentrations and CO₂ efflux from a forest floor. *Agricultural and Forest Meteorology.* 124: 219-236. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.01.013>.
- Johnson, D. E. 2000. *Métodos multivariados aplicados al análisis de datos*. International Thomson Editores. México, D. F. ISBN: 9789687529905.
- Khan, K. S. and R. G. Joergensen. 2012. Relationships between P fractions and the microbial biomass in soils under different land use management. *Geoderma* 173-174: 274-281. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.12.022>.
- Kelting, D. L., J. A. Burguer, S. C. Patterson, W. M. Aust, M. Miwa, and C. C. Trettin. 1999. Soil quality assessment in domesticated forests - a southern pine example. *For. Ecol. Manage.* 122: 167-185. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00040-7).

- Li, P., T. Zhang, X. Wang, and D. Yu. 2013. Development of biological soil quality indicator system for subtropical China. *Soil Tillage Res.* 126: 112-118. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.07.011>.
- Margalef, O., J. Sardans, M. Fernández-Martínez, R. Molowny-Horas, I. A. Janssens, P. Ciais, D. Goll, A. Richter, M. Obersteiner, D. Asensio, and J. Peñuelas. 2017. Global patterns of phosphatase activity in natural soils. *Sci. Rep.* 7: 1337. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01418-8>.
- Miehlich, G. 1980. Los suelos de la Sierra Nevada (Tomo descriptivo: tablas, graficas, descripciones de los perfiles, mapas). Fundación Alemana para la Investigación Científica. Zúbal-Books. Cleveland, OH, USA.
- Muñoz-Rojas, M. 2018. Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. *Curr. Opin. Environ. Sci. Health* 5: 47-52. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.04.007>.
- Neina, D. 2019. The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation, review article. *Appl. Environ. Soil Sci.* 2019: 5794869. doi: <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>.
- Nguyen, T. T. and P. Marschner. 2017. Soil respiration, microbial biomass and nutrient availability in soil after addition of residues with adjusted N and P concentrations. *Pedosphere* 27: 76-85. doi: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60297-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60297-2).
- Pennock, D. J. and C. van Kessel. 1997. Clear-cut forest harvest impacts on soil quality indicators in the mixedwood forest of Saskatchewan, Canada. *Geoderma* 75: 13-32. doi: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(96\)00075-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00075-4).
- Rabot, E., M. Wiesmeier, S. Schlüter, and H. J. Vogel. 2018. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma* 314: 122-137. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>.
- Robertson, G. P., D. C. Coleman, C. S. Bledsoe, and P. Sollins. 1999. Standard soil methods for long-term ecological research. Oxford University Press. New York, NY, USA. ISBN: 0195120833.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. SEMARNAT. México, D. F.
- Shi, W., H. Yao, and D. Bowman. 2006. Soil microbial biomass, activity and nitrogen transformation in a turfgrass chronosequence. *Soil Biol. Biochem.* 38: 311-319. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.05.008>.
- Sun, W., H. Zhu, and S. Guo. 2015. Soil organic carbon as a function of land use and topography on the Loess Plateau of China. *Ecol. Engin.* 83: 249-257. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.06.030>.
- Tabatabai, M. A. 1994. Soil enzymes. pp. 775-883. *In*: P. J. Bottomley, J. S. Angle, and R. W. Weaver (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties.* Wiley. Soil Science Society of America. Madison, WS, USA. ISBN: 089118810X.
- Tamayo-Vélez, Á. and N. W. Osorio. 2018. Soil fertility improvement by litter decomposition and inoculation with the fungus *Mortierella* sp. in avocado plantations of Colombia. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 49: 139-147. doi: <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1417420>.
- Thomazini, A., E. S. Mendoca, I. M. Cardoso, and M. L. Garbin. 2015. SOC dynamics and soil quality index of agroforestry systems in the Atlantic rainforest of Brazil. *Geo. Reg.* 5: 15-24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.02.003>.
- Tobón, W., T. Urquiza-Haas, P. Koleff, M. Schröter, R. Ortega-Álvarez, J. Campo, R. Lindig-Cisneros, J. Sarukhán, and A. Bonn. 2017. Restoration planning to guide Aichi targets in a megadiverse country. *Conserv. Biol.* 31: 1086-1097. doi: <https://doi.org/10.1111/cobi.12918>.
- Watt, M. S., G. Coker, P. W. Clinton, M. R. Davis, R. Parfitt, R. Simcock, L. Garrett, T. Payn, B. Richardson, and A. Dunningham. 2005. Defining sustainability of plantation forest through identification of site quality indicators influencing productivity - A national view for New Zealand. *For. Ecol. Manage.* 216: 51-63. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.064>.