

INDICADORES BIOQUÍMICOS EN SUELOS DE UN TRANSECTO ALTITUDINAL EN EL EJE NEVOLCÁNICO MEXICANO

BIOCHEMICAL INDICATORS IN SOILS FROM AN ALTITUDINAL TRANSECT AT THE MEXICAN NEVOLCANIC BELT

Silvia Pajares-Moreno¹, Juan F. Gallardo-Lancho^{1*}, Jorge D. Etchevers-Barra²

¹Consejo Superior de Investigaciones Científicas, IRNA. 37071. Salamanca, España. (jgallard@usal.es). ²Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados. 56230. Estado de México, México.

RESUMEN

Los aspectos bioquímicos de los tepetates (capas volcánicas endurecidas) y suelos originados de materiales volcánicos han sido poco estudiados. En este trabajo se evaluó el flujo de CO₂ (FC) y propiedades bioquímicas de suelos volcánicos representativos de México. Se eligieron cinco suelos en un transecto del volcán Tláloc con diferentes usos: pastizal culminal (PC), pino-encino (PE), pino reforestado (PR), tepetate desnudo (TD) y formaciones halófitas del ex-lago de Texcoco (LT), situados a 2950, 3010, 2700, 2650 y 2220 m de altitud. Los suelos del transecto corresponden a la secuencia: *Phaeozems* (PC), *Luvissols* (PE y PR), *tepetates* (TD) y *Solonchacks* (LT). En cada zona se tomaron muestras edáficas (0-15 cm) y se midió *in situ* el FC y la humedad del suelo (HS) periódicamente de agosto 2005 a julio 2006. Las variables determinadas fueron: C orgánico edáfico (COS), N total (Nt), C y N de la biomasa microbiana, respiración basal (RS), amonificación de la arginina y actividades enzimáticas (dehidrogenasa, β -glucosidasa, fosfatasa, ureasa y proteasa). Las zonas más degradadas (TD y LT) tuvieron valores más bajos en todas las variables, mientras que las más conservadas (PE y PC) mostraron valores más altos (sobre todo en COS, Nt, biomasa microbiana y actividades enzimáticas). La RS y el FC fueron escasos en TD (8.1 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ y 0.05-0.07 $\text{g m}^{-2} \text{ ha}^{-1}$), ya que se trata de un sustrato endurecido sin cubierta vegetal y con bajo contenido de COS y Nt (0.8 mg C g^{-1} y 0.13 mg N g^{-1}). El mayor contenido de COS en PE y PC (55.2 y 32.7 mg C g^{-1}) y la HS durante la época de lluvia promueven la actividad microbiana edáfica y con ello el FC (1.22 y 1.05 $\text{g m}^{-2} \text{ ha}^{-1}$ en agosto). Las variables bioquímicas seleccionadas, de fácil medida e interpretación, son indicadores idóneos para evaluar la calidad de suelos volcánicos mexicanos en diferentes condiciones ambientales.

ABSTRACT

The biochemical aspects of the tepetates (hardened volcanic layers) and soils coming from volcanic materials have been little studied. The flow of CO₂ (FC) and the biochemical properties of volcanic soils representative of México were evaluated in this work. Five soils were chosen in a transect of the Tláloc volcano with different uses: cuminal grassland (PC), pine-oak (PE), reforested pine (PR), bare tepetate (TD), and halophytic formations of the former Lake of Texcoco (LT), located at 2950, 3010, 2700, 2650, and 2220 m altitude. The soils of the transect correspond to the sequence: *Phaeozems* (PC), *Luvissols* (PE and PR), *tepetates* (TD) and *Solonchacks* (LT). In each zone soil samples were taken (0-15 cm deep) and FC and soil moisture (HS) were periodically measured *in situ* from August 2005 to July 2006. The variables determined were: soil organic C (SOC), total N (Nt), microbial biomass C and N, basal respiration (RS), ammonification of arginine, and enzyme activities (dehydrogenase, β -glucosidase, phosphatase, urease and protease). The most degraded areas (TD and LT) recorded lower values in all variables, whereas the best preserved (PE and PC) showed higher values (especially in SOC, Nt, microbial biomass and enzyme activities). The RS and FC were low in TD (8.1 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ and 0.05-0.07 $\text{g m}^{-2} \text{ ha}^{-1}$), since this is a hardened substrate without a plant cover and low content of SOC and Nt (0.8 mg C g^{-1} and 0.13 mg N g^{-1}). The higher content of SOC in PE and PC (55.2 and 32.7 mg C g^{-1}) and HS during the rainfall period promote soil microbial activity and thus FC (1.22 and 1.05 $\text{g m}^{-2} \text{ ha}^{-1}$ in August). The biochemical variables selected, of easy measurement and interpretation, are suitable indicators to assess the quality of Mexican volcanic soils under different environmental conditions.

*Autor responsable \diamond Author for correspondence.

Recibido: Febrero, 2009. Aprobado: Noviembre, 2009.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 44: 261-274. 2010.

Key words: enzymatic activity, microbial biomass, soil organic C, CO₂ flux, volcanic soils, tepetate.

Palabras clave: actividad enzimática, biomasa microbiana, C orgánico edáfico, flujo de CO₂, suelos volcánicos, tepetate.

INTRODUCCIÓN

En México los suelos de origen volcánico se ubican principalmente en laderas y piedemontes del Eje Neovolcánico Mexicano (ENM; 19° N) y presentan impacto antrópico por sobreexplotación. Extensas superficies se encuentran erosionadas, con baja fertilidad y productividad (Gama-Castro *et al.*, 2007). Esta erosión ha expuesto amplias áreas de tepetates (capas de tobas volcánicas endurecidas por procesos geológicos o pedológicos; Etchevers *et al.*, 2006), ubicados entre 1800 y 3400 m a lo largo del ENM (Zebrowski, 1992).

En los estados de Tlaxcala y México los tepetates ocupan una superficie de poco más de 30 000 km² (Zebrowski, 1992). La densa población humana de ambos estados ejerce una elevada presión sobre las tierras de cultivo; por tanto, es importante la recuperación y conservación de los suelos de los citados estados para mejorar la calidad de vida de la zona.

Por las razones señaladas conviene encontrar indicadores sensibles al efecto de la degradación que alerten tempranamente de los posibles cambios negativos. Entre las propiedades biológicas edáficas reportadas como indicadores sensibles a cambios en la calidad edáfica (Joergensen y Castillo, 2001; Salamanca *et al.*, 2002) destacan las actividades de ciertas enzimas edáficas (Dick *et al.*, 1996; Liu *et al.*, 2008), dado que resultan más sensibles a los agentes externos que la materia orgánica del suelo (MOS, otro indicador común) a corto o medio plazo (Caravaca *et al.*, 2002).

Algunas actividades enzimáticas (como las hidrolasas) indican el potencial del suelo para efectuar reacciones bioquímicas específicas necesarias para mantener la fertilidad edáfica (Burns, 1982). La ureasa (URa) y la proteasa (PRa) hidrolizan el N orgánico para producir N inorgánico; la primera usa como sustrato la urea y la segunda compuestos peptídicos. La fosfatasa (PHa) cataliza la hidrólisis de los compuestos de P orgánico a P inorgánico. La β -glucosidasa (GLa) hidroliza los enlaces β -D-glucopiranosidos de las grandes cadenas de carbohidratos, proporcionando estructuras carbónicas esenciales y energía para el crecimiento de los organismos heterótrofos del suelo (Eivazi y Zakaria, 1993; Pascual *et al.*, 2000).

INTRODUCTION

In México, volcanic soils are located mainly on slopes and foothills of the Mexican Neovolcanic Belt (ENM; 19° N) and show anthropogenic impact due to overexploitation. Large areas are eroded, with low fertility and productivity (Gama-Castro *et al.*, 2007). This erosion has exposed large areas of tepetates (layers of hardened volcanic tuff as a result of geological or pedological processes; Etchevers *et al.*, 2006), located between 1800 and 3400 m along the ENM (Zebrowski, 1992).

In the states of Tlaxcala and México the tepetates cover an area of more than 30 000 km² (Zebrowski, 1992). The dense human population in both states puts great pressure on croplands, so soil recovery and conservation are important in these states to improve the quality of life in the area.

For the above reasons it is advisable to find indicators susceptible to the effects of degradation that can early alert of possible negative changes. Among the biological properties of soil reported as sensitive indicators to changes in soil quality (Joergensen and Castillo, 2001; Salamanca *et al.*, 2002) the activities of certain soil enzymes (Dick *et al.*, 1996, Liu *et al.*, 2008) stand out, given that they are more sensitive to external agents than soil organic matter (SOM, another common indicator) in the short or medium term (Caravaca *et al.*, 2002).

Some enzymatic activities (such as hydrolases) indicate the potential of the soil to make specific biochemical reactions necessary for the maintenance of soil fertility (Burns, 1982). Urease (URE) and protease (Pra) hydrolyze organic N to produce inorganic N; the first one uses urea as substrate and the second peptide compounds. Phosphatase (PHA) catalyzes the hydrolysis of organic-P compounds to inorganic P (phosphates). The β -glucosidase (GLa) hydrolyzes the β -D-glucopyranosides of the big carbohydrate chains, providing essential C structures and energy for the growth of soil heterotrophic organisms (Eivazi and Zakaria, 1993; Pascual *et al.*, 2000).

The SOM is involved in nutrient recycling, soil productivity and soil structure formation and stability; besides, it influences water infiltration, root development, and resistance to erosion, and, therefore, it is considered crucial in the sustainability of soil ecosystems (Stevenson and Cole, 1999). The labile fraction of SOM is the first to be altered by

La MOS participa en el reciclaje de nutrientes, en la productividad del suelo y en la formación y estabilidad de la estructura edáfica; también influye en la infiltración de agua, el desarrollo de raíces y la resistencia a la erosión, por lo que se considera crucial en la sostenibilidad de ecosistemas edáficos (Stevenson y Cole, 1999). La fracción lábil de la MOS es la primera en ser alterada por agentes externos y es también la más susceptible a la mineralización (Haynes, 2000). Debido a su naturaleza dinámica, dicha fracción es más sensible a corto plazo que la MOS total a cambios en los flujos de C en los sistemas; por ello se usa como indicador temprano de cambios en la calidad de la MOS por el efecto de manejos edáficos (Murata *et al.*, 1998; Haynes, 2000).

La biomasa microbiana del suelo (BM) es el componente activo de la MOS y su estudio proporciona una mejor comprensión del reciclaje del C y N edáficos. El contenido de BM es una medida útil para estudiar los efectos del manejo edáfico y hacer comparaciones entre suelos de ecosistemas conservados y perturbados (Powlson *et al.*, 1987; Liu *et al.*, 2008). La respiración basal (RS) es otra variable usada para determinar la actividad potencial de la BM en condiciones normalizadas, dado que el valor de la respiración *in situ* cambia constantemente al estar influenciada por la temperatura y la humedad ambiental, o el contenido de agua en el suelo (Li y Chen, 2004; Li *et al.*, 2008).

En los ecosistemas terrestres el clima, la temperatura y la humedad edáfica, el tipo de vegetación, la cubierta vegetal y el uso del suelo son factores que influyen en el flujo de CO₂ (FC), haciéndolo variable aun en cortos periodos de tiempo (Davidson *et al.*, 1998; Li *et al.*, 2008). Además de las características del suelo influye, particularmente, la cantidad de residuos orgánicos que actúan como substrato susceptible de ser mineralizado (Stevenson y Cole, 1999). La cuantificación del FC del suelo a la atmósfera permite conocer la dinámica temporal de la actividad microbiana edáfica y el efecto de las condiciones climáticas, especialmente cuando se normalizan las condiciones de medida. A partir de esta información se puede realizar el balance de este gas y modelar los posibles impactos del cambio de uso de suelo en la dinámica de la MOS.

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) evaluar diversas variables químicas y bioquímicas como indicadores de calidad de suelos de origen volcánico representativos de México sujetos a diferentes grados

external agents and is also the most susceptible to mineralization (Haynes, 2000). Due to its dynamic nature, this fraction is in the short term more sensitive than total SOM to changes in the flows of C in the systems; hence it has been used as an indicator of early changes in the quality of SOM resulting from soil management (Murata *et al.*, 1998; Haynes, 2000).

The soil microbial biomass (BM) is the active component of SOM and its study provides a better understanding of the recycling of soil C and N. The content of BM is a useful measure to study the effects of soil management and make comparisons among the soils of conserved and disrupted ecosystems (Powlson *et al.*, 1987, Liu *et al.*, 2008). Basal respiration (RS) is another variable used to determine the potential activity of BM under standard conditions, since the value of the *in situ* respiration constantly changes as it is influenced by temperature and humidity, or the soil water content (Li and Chen, 2004; Li *et al.*, 2008).

In terrestrial ecosystems, climate, temperature and soil moisture, vegetation type, land cover and land use are factors that influence the flow of CO₂ (FC), making it changeable even in short periods of time (Davidson *et al.*, 1998; Li *et al.*, 2008). In addition to soil features, the amount of organic waste has a particular influence as it acts as a substrate susceptible of being mineralized (Stevenson and Cole, 1999). When measurement conditions become normal, the FC quantification from the soil into the atmosphere enables to learn about the temporary dynamics of the soil microbial activity and the effect of climate conditions. From this information, it is possible to make a balance of this gas and model the possible impacts of land use change on the dynamics of SOM.

The objectives of this study were: 1) to evaluate various chemical and biochemical variables as quality indicators of volcanic soils representative of México, subjected to different degrees of degradation; and 2) to determine the FC in some of these soils and its relation to soil moisture (HS) and the biochemical variables under study.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The work was conducted in an altitudinal transect representative of soils of volcanic origin located in the ENM,

de degradación; 2) determinar el FC en algunos de estos suelos y su relación con la humedad edáfica (HS) y las variables bioquímicas de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

El trabajo se efectuó en un transecto altitudinal representativo de suelos de origen volcánico ubicado en el ENM, concretamente en el volcán Tláloc (Estado de México). El clima en la región es templado subhúmedo, con temperaturas medias anuales entre 10 y 17 °C. La precipitación anual varía entre 650 y 1060 mm en función directa de la altura del transecto, concentrándose las lluvias en verano (García, 1988).

En el transecto se distinguen varios tipos de suelo y vegetación (condicionada por el uso de la tierra; Cuadro 1): 1) pino-encino (PE) a 3010 m de altitud; bosque mixto de pinos y especies latifoliadas bien conservado, sobre un *Luvisol ándico* desarrollado y profundo (>1 m); 2) pastizal cuminal (PC) a 2950 m; pastizal de zacate asentado sobre un *Phaeozem lúvico* profundo (>1 m); 3) pino reforestado (PR) a 2700 m; zona de terrazas con pinos reforestados hace 30 años donde el nivel de tepetate está recubierto por un *Luvisol háplico* poco profundo; 4) tepetate desnudo (TD) a 2650 m; zona erosionada de terrazas agrícolas y forestales, donde afloran a la superficie sustratos endurecidos de *tepetates* (Etchevers *et al.*, 2006); 5) formación de halófitas (LT) en la planicie a 2220 m; pastizal de halófitas en suelos salinos degradados (*Solonchack gleico*) en el ex-lago de Texcoco.

Variabes químicas y bioquímicas como indicadores de calidad edáfica

En agosto de 2005 (época de lluvia y, por tanto, de mayor actividad microbiana) se recolectaron tres muestras compuestas

específicamente en el Tláloc volcano (State of México). The climate in the region is subhumid temperate, with mean annual temperatures ranging between 10 and 17 °C. The annual rainfall varies between 650 and 1060 mm, depending on the transect height, mostly concentrated in the summer (García, 1988).

In the transect we distinguished various types of soil and vegetation (conditioned by land use; Table 1): 1) pine-oak (PE) at an altitude of 3010 m; well-preserved mixed pine forest of hardwood species on a developed and deep *Luvisol andic* (>1 m); 2) cuminal grassland (PC) at 2950 m; grass pasture grown on a deep *Phaeozem luvic* (>1 m); 3) reforested pine (RP) at 2700 m, area of terraces with pine trees reforested 30 years ago, where the tepetate is covered by a shallow *Haplic Luvisol*; 4) bare tepetate (TD) at 2650 m; an eroded area of agricultural and forest terraces, where hardened substrates of *tepetates* are exposed on the surface (Etchevers *et al.*, 2006); 5) formation of halophytes (LT) on the plain at 2220 m; halophyte grassland on degraded saline soils (*Solonchack gleico*) in the former lake of Texcoco.

Chemical and biochemical variables as indicators of soil quality

In August 2005 (rainy season and therefore of greater microbial activity) we collected three composite samples of soil in each plot, made up in turn of 10 simple samples each, from 0 to 15 cm deep (the layer most sensitive to changes) by using a cylindrical auger. The samples were homogenized and sieved with a 2 mm mesh, manually separating the macroscopic SOM from the mineral soil. Some of them were air dried for physical and chemical analysis, while the other was stored at 4 °C (previously measuring its humidity) for biochemical analysis.

Cuadro 1. Características ecogeomorfológicas de los lugares experimentales.

Table 1. Eco-geomorphological characteristics of the experimental sites.

Sitios	LT	TD	PR	PC	PE
Altura (m)	2220	2650	2700	2950	3010
Latitud N	19° 27' 55"	19° 27' 37"	19° 27' 34"	19° 26' 50"	19° 26' 38"
Longitud O	98° 55' 18"	98° 47' 20"	98° 47' 13"	98° 46' 36"	98° 46' 8"
Precipitación anual (mm)	630	750	800	940	1060
T ^a media anual (°C)	17	15	14	11	10
†Tipo de suelo	<i>Solonchack gleico</i>	<i>Tepetate</i>	<i>Luvisol háplico</i>	<i>Phaeozem lúvico</i>	<i>Luvisol ándico</i>
†Vegetación dominante	Pastizal halófito	Sin vegetación	<i>Pinus ayacahuite</i>	Pastizal autóctono	<i>Quercus obtusata</i> , <i>P. pseudostrobus</i> , <i>Abies religiosa</i>

† Fuente: Pajares (2008) ❖ Source: Pajares (2008).

de suelo en cada parcela, formadas a su vez por 10 muestras simples cada una, de 0 a 15 cm de profundidad (la capa más sensible a los cambios) con una barrena cilíndrica. Las muestras fueron homogeneizadas y tamizadas con una malla de 2 mm, separándose manualmente la MOS macroscópica del suelo mineral. Una parte se secó al aire para efectuar los análisis físicos y químicos, mientras que otra se guardó a 4 °C (previa medida de su humedad) para los análisis bioquímicos.

El C orgánico del suelo (COS) se analizó por combustión seca y determinación infrarroja del CO₂ generado (*TOC Autoanalyzer*, Shimadzu) y el N total (Nt) por el método micro-Kjeldahl (Bremner, 1996). El C y N de la biomasa microbiana (C-BM y N-BM) se analizaron por fumigación con cloroformo seguido de extracción con K₂SO₄ 0.5 M (Vance *et al.*, 1987). El C-BM se determinó por oxidación con K₂Cr₂O₇ (Nelson y Sommers, 1996) y el N-BM usando el método de la ninhidrina (Joergensen y Brookes, 1990).

La RS *in vitro* se calculó mediante el cociente entre el C-CO₂ emitido en el experimento y su tiempo de duración. Las muestras se introdujeron en frascos de cierre hermético a 25 °C y se ajustaron a una humedad del 55 % de la capacidad de campo por 30 d de incubación. El CO₂ generado se recogió periódicamente en 10 mL de NaOH 0.5 M, valorándose con HCl 0.5 N (Hernández y García, 2003).

La actividad deshidrogenasa (DHa) se determinó según el método de Casida *et al.* (1964) modificado, basado en la evaluación del grado de reducción del cloruro de trifeniltetrazolio (TTC) a trifenilformazán (TPF) tras incubar el suelo 24 h a 25 °C. La amonificación de la arginina (AAr) se calculó mediante la formación de amoniaco liberado tras incubar el suelo con arginina como sustrato por 2 h a 25 °C de acuerdo con Alef y Kleiner (1987) modificado. Las actividades GLa y PHa se determinaron mediante el método de Tabatabai (1994) basado en la colorimetría del *p*-nitrofenol obtenido tras incubar el suelo 90 min a 37 °C, añadiendo *p*-nitrofenil glucopiranosido y *p*-nitrofenil fosfato. La actividad URa se analizó determinando el amonio liberado tras incubar las muestras con urea como sustrato por 90 min a 37 °C (Nannipieri *et al.*, 1980); y la PRa determinando los péptidos liberados tras incubar el suelo 2 h a 50 °C usando caseína como sustrato (Ladd y Butler, 1972).

El FC del suelo se midió con un sistema de respiración de suelo *SRS (PP systems)* y la HS con un *TDR* a 0-15 cm de profundidad. Se tomaron medidas de dichas variables en 10 puntos diferentes de cada parcela experimental una vez por mes desde agosto de 2005 a julio de 2006 durante las primeras horas de la mañana.

Análisis estadísticos

Todas las determinaciones se realizaron por triplicado. Los datos mostraron una distribución normal y se realizó un análisis

The soil organic C (SOC) was analyzed using dry combustion and infrared determination of the CO₂ generated (*TOC Autoanalyzer*, Shimadzu) and total N (Nt) with the method micro-Kjeldahl (Bremner, 1996). The C and N from microbial biomass (C-BM and N-BM) were analyzed by using fumigation with chloroform followed by extraction with 0.5 M K₂SO₄ (Vance *et al.*, 1987). The C-BM was determined through oxidation with K₂Cr₂O₇ (Nelson and Sommers, 1996) and the N-BM by using the ninhydrin method (Joergensen and Brookes, 1990).

The RS *in vitro* was calculated with the quotient between the C-CO₂ delivered in the experiment and its duration. The samples were introduced in airtight jars at 25 °C and adjusted to a humidity of 55 % of field capacity during 30 d of incubation. The CO₂ produced was collected periodically in 10 mL of 0.5 M NaOH, and titrated with a standard solution of 0.5 N HCl (Hernández and García, 2003).

The dehydrogenase activity (DHA) was determined following the method of Casida *et al.* (1964) modified, based on the estimation of the degree of reduction of triphenyltetrazolium chloride (TTC) to trifenilformazan (TPF) after incubating the soil for 24 h at 25 °C. The ammonification of arginine (AAr) was calculated through the formation of ammonia released after incubating the soil with arginine as a substrate for 2 h at 25 °C, according to Alef and Kleiner (1987) modified. The activities of GLa and PHa were determined by the method of Tabatabai (1994) based on the colorimetry of *p*-nitrophenol obtained after incubating the soil for 90 min at 37 °C, adding glucopyranoside *p*-nitrophenyl and phosphate *p*-nitrophenyl. The URa activity was analyzed by determining the ammonia released after the incubation of samples with urea as substrate for 90 min at 37 °C (Nannipieri *et al.*, 1980); and the PRa by determining the peptides released after a 2 h incubation of the soil at 50 °C using casein as substrate (Ladd and Butler, 1972).

The soil FC was measured with a soil respiration system *SRS (PP systems)* and the HS with a *TDR* at 0-15 cm deep. Measurements of these variables were taken in 10 different points in each experimental plot once a month, from August 2005 to July 2006 during the early morning hours.

Statistical analysis

All determinations were performed in triplicate. Data showed a normal distribution and a one-way variance analysis (Tukey, $p \leq 0.05$) by soil type was carried out. A Pearson correlation analysis was performed to determine the interrelation among the biochemical variables. The SPSS® 11.5 program was used for the statistical analysis.

de varianza de una vía (Tukey; $p \leq 0.05$) por tipo de suelo. Se efectuó un análisis de correlación de Pearson para conocer la interrelación entre las variables bioquímicas. Se usó el programa SPSS® 11.5 para el análisis estadístico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables químicas y bioquímicas como indicadores de calidad edáfica

El pH edáfico varió de ligeramente ácido en PC y PE (con precipitaciones anuales mayores de 900 mm) hasta básico en TD, donde la infiltración de agua, la actividad microbiana y el establecimiento de plantas son muy limitados. En LT fue alcalino debido a la existencia de Na_2CO_3 , observándose costras superficiales durante la época seca. Los porcentajes de saturación de bases fueron superiores al 50 %, pero decrecen en los suelos ubicados a mayor elevación en la catena por aumentar la precipitación, produciendo lavado de bases por escorrentía e infiltración más intensamente cuanto mayor es la cantidad de lluvias. Destaca el suelo de PE por sus altos contenidos de CIC (y MOS), mientras que el valor más bajo se encontró en el tepetate, prácticamente desprovisto de MOS (Cuadro 2).

En general, los contenidos de COS y Nt fueron bajos (de 0.8 a 55.2 mg C g^{-1} y de 0.13 a 3.3 mg N g^{-1}) en comparación con otros suelos volcánicos (Murata *et al.*, 1998; Joergensen y Castillo, 2001). Estas dos variables aumentaron con la altura del transecto, de modo que los no perturbados (PE y PC) mostraron los valores más altos de COS y Nt. En LT los contenidos de estos dos bioelementos fueron

RESULTS AND DISCUSSION

Chemical and biochemical variables as indicators of soil quality

The soil pH ranged from slightly acid in PC and PE (with annual rainfall over 900 mm) to basic in TD, where the infiltration of water, microbial activity, and the establishment of plants are very limited. The pH was alkaline in LT because of the existence of Na_2CO_3 , with surface crusts appearing during the dry season. The percentages of soil base saturation were higher than 50 %, but decreased in the soils located at a higher elevation in the catena due to increased precipitation; it led to a more intense leaching of bases due to runoff and infiltration resulting from greater rainfall. The PE soil stands out for its high content of CIC (and SOM), while the lowest value was found in the tepetate, virtually devoid of SOM (Table 2).

In general, the contents of SOC and Nt were low (0.8 to 55.2 mg C g^{-1} and from 0.13 to 3.3 mg N g^{-1}) in comparison with other volcanic soils (Murata *et al.*, 1998; Joergensen and Castillo, 2001). These two variables increased with the elevation of the site in the transect, so that the undisturbed (PE and PC) showed the highest values of SOC and Nt. In LT the content of these two bio-elements were low due to the soil saline character that limits biomass production. In TD, the SOC and Nt were very low (0.8 mg C g^{-1} and 0.13 mg N g^{-1}), which is characteristic of this type of hardened volcanic substrates (Etchevers and Ferrera-Cerrato, 1994). In PR they were also low (9.9 mg C g^{-1} and 0.52 mg N g^{-1}) despite being a

Cuadro 2. Principales características de los suelos del transecto.

Table 2. Main characteristics of the transect soils.

Variables/Sitios	LT	TD	PR	PC	PE
Textura	Arenosa	Franco-arenosa	Arcillosa	Franca	Franca
Da (Mg m^{-3})	1.2 b	1.4 a	1.0 c	0.9 c	0.7 d
pH (H_2O 1:2)	9.1 a	7.6 b	6.7 c	5.0 d	6.3 c
C.I.C. (cmolc kg^{-1})	26.5 b	21.0 c	27.9 b	25.1 b	33.7 a
S. B. (%)	100 a	96.1 a	80.8 b	62 c	75.6 bc
COS (mg C g^{-1})	10.1 c	0.8 d	9.9 c	32.7 b	55.2 a
Nt (mg N g^{-1})	0.53 c	0.13 d	0.52 c	2.2 b	3.3 a
C/N	19.1 a	6.2 c	19.0 a	14.8 b	16.7 b

Da: densidad aparente; C.I.C.: capacidad de intercambio catiónico; S. B.: saturación de bases; COS: C orgánico del suelo; Nt: N total. Valores con distinta letra en cada fila son diferentes ($p \leq 0.05$) ♦ Da: bulk density; C.I.C.: cation exchange capacity; S.B.: base saturation; COS: soil organic C; Nt: total N. Values with different letters in each row are different ($p \leq 0.05$).

bajos debido al carácter salino del suelo, que limita las producciones de biomasa. En TD el COS y el Nt fueron muy bajos (0.8 mg C g^{-1} y 0.13 mg N g^{-1}), lo cual es característico en este tipo de sustratos volcánicos endurecidos (Etchevers y Ferrera-Cerrato, 1994). En PR fueron también bajos (9.9 mg C g^{-1} y 0.52 mg N g^{-1}) a pesar de tratarse de una formación forestal, dado que el suelo no es muy profundo (de 20 a 30 cm) y la densidad de arbolado es baja y, por tanto, la producción escasa.

La relación C/N en estos suelos varió entre 6.2 y 19.1. El valor más bajo se encontró en TD debido a la escasa disponibilidad de C para el desarrollo microbiano. La relación C/N fue muy alta en PR y PE a causa de la elevada acumulación de residuos orgánicos sobre el suelo.

En el Cuadro 3 se muestran las propiedades bioquímicas de los suelos del transecto. En general, los valores más elevados se encontraron en los sitios altos y mejor conservados (PE y PC) y los más bajos en los más degradados (TD y LT); esto es, obedece a la secuencia: PE>PC>PR>LT>TD (paralelo al patrón de los contenidos de COS y Nt).

Los valores de C-BM y N-BM aumentaron significativamente (de 49 a $252 \mu\text{g C-BM g}^{-1}$ y de 6.7 a $40.2 \mu\text{g N-BM g}^{-1}$) al ascender en la catena. La BM se correlacionó estrechamente con el COS y Nt (Cuadro 4), sugiriendo que la BM está muy asociada con la MOS, pudiéndose usar como indicador temprano de cambios en la MOS (Powlson *et al.*, 1987). Los altos valores de BM en PE y PC se deben a la alta

forest formation as the soil is not very deep (from 20 to 30 cm) and tree density is low and thus the above production limited.

The C/N relationship in these soils ranged between 6.2 and 19.1. The lowest value was found in TD because of the limited availability of C for microbial growth. The C/N relationship was very high in PR and PE because of the high accumulation of organic residues on the soil.

The biochemical properties of the transect soils are shown in Table 3. In general, the higher values were found in the high and best preserved sites (PE and PC) and the lower in the most degraded (TD and LT); that is, it is due to the sequence PE>PC>PR>LT>TD (parallel to the pattern of SOC and Nt contents).

The values of C-BM and N-BM increased significantly (from 49 to $252 \mu\text{g C-BM g}^{-1}$ and from 6.7 to $40.2 \mu\text{g N-BM g}^{-1}$) on ascending the catena. The BM was closely correlated with the SOC and Nt (Table 4), suggesting that BM is very much associated with SOM, and can be used as an early indicator of changes in SOM (Powlson *et al.*, 1987). The high values of BM in PE and PC are due to a high microbial activity in response to the higher content of SOM in these soils with respect to the others included in the transect. Furthermore, the release of exudates by the abundant plant roots of these sites means that they are an energy source for microorganisms. The BM values of the soils of this transect (except TD, greatly reduced by the peculiarity of the substrate) are common in many

Cuadro 3. Propiedades bioquímicas de los suelos del transecto.
Table 3. Biochemical properties of the transect soils.

Sitios	LT	TD	PR	PC	PE
C-BM ($\mu\text{g g}^{-1}$)	142 c	49 d	150 c	208 b	252 a
N-BM ($\mu\text{g g}^{-1}$)	11.8 d	6.7 e	18.5 c	26.4 b	40.2 a
RS ($\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	15.5 c	8.1 d	23 b	23.6 b	27.8 a
DHa ($\mu\text{g TPF g}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	143 d	22.9 e	240 c	352 b	489 a
AAa ($\mu\text{g NH}_4\text{-N g}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	0.95 b	0 c	0.95 b	1.41 a	1.47 a
GLa ($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	76 d	11.2 e	150 c	181 b	282 a
PHa ($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	805 d	164 e	1810 c	2992 b	3809 a
URa ($\mu\text{g NH}_4\text{-N g}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	30 d	5.3 e	71 c	81 b	127 a
PRa ($\mu\text{g tirosina g}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	63 d	9.2 e	77 c	149 b	189 a

C-BM: C de biomasa microbiana; N-BM: N de biomasa microbiana; RS: respiración del suelo; DHa: actividad deshidrogenasa; AAa: amonificación de la arginina; GLa: actividad b-glucosidasa; PHa: actividad fosfatasa; URa: actividad ureasa; PRa: actividad proteasa. Valores con distinta letra en cada fila son diferentes ($p \leq 0.05$) ❖ C-BM: microbial biomass C; N-BM: microbial biomass N; RS: soil respiration, DHa: dehydrogenase activity; AAa: ammonification of arginine; GLa: b-glucosidase activity; PHa: phosphatase activity; URa: urease activity; PRa: protease activity. Values with different letters in each row are different ($p \leq 0.05$).

actividad microbiana como respuesta al mayor contenido de MOS de estos suelos con respecto a los otros del transecto. Además, la liberación de exudados por las abundantes raíces de las plantas de estos sitios significa fuente de energía para los microorganismos. Los valores de BM de los suelos de este transecto (salvo en TD, muy reducidos por la peculiaridad del sustrato) son comunes en muchos suelos volcánicos de zonas tropicales (Muratta *et al.*, 1998; Joergensen y Castillo, 2001). El muy bajo valor de BM en el TD revela que la erosión tiene un efecto negativo en la población microbiana edáfica.

La RS fue significativamente más baja en TD ($8.1 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$) por el escaso contenido de COS de este sustrato, mientras que en PE se obtuvieron los mayores valores significativos de RS ($27.8 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$), congruente con el mayor contenido de COS. La RS mostró una alta correlación con el C-BM ($R=0.928$) en los diferentes suelos del transecto, ya que la actividad respiratoria depende en gran medida de procesos asociados con la BM (Salamanca *et al.*, 2002). Según Wang *et al.* (2003) la disponibilidad de sustrato carbonado orgánico es el principal determinante de la RS. La degradación de suelos, sea la erosión (que originó la aparición del tepetate en TD) o la salinización (en LT), produce la disminución del contenido de COS y, por ende, disminución de la actividad microbiana edáfica, quedando evidenciado por una marcada disminución de los niveles de RS.

Hubo una asociación muy significativa entre las actividades enzimáticas estudiadas y el COS, Nt y

volcanic soils of the tropics (Muratta *et al.*, 1998; Joergensen and Castillo, 2001). The very low value of BM in TD reveals that erosion has a negative effect on soil microbial population.

The RS was significantly lower in TD ($8.1 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$) due to the low SOC content of this substrate, whereas in PE the highest significant values of RS ($27.8 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$) were obtained, consistent with a higher content of SOC. The RS showed a high correlation with C-BM ($R=0.928$) in the different transect soils, since the respiratory activity depends largely on processes associated with the BM (Salamanca *et al.*, 2002). According to Wang *et al.* (2003) the availability of organic C substrate is the main determinant of RS. Soil degradation, either because of erosion (which led to the emergence of the tepetate in TD) or salinization (in LT), produces a decrease of the SOC content and hence a reduced soil microbial activity, that becomes evident by a substantial drop of the RS levels.

There was a very significant association between the enzyme activities studied and the SOC, Nt, and BM, indicating that these activities are induced by the BM and conditioned by the energy available (Garcia *et al.*, 1994; Caravaca *et al.*, 2002). We also found a high correlation among all hydrolase enzyme activities (URa, PRa, GLa, and PHa), which suggests that there is a balance among the cycles of the key nutrients.

The DHA activity ranged from 22.9 (TD) to $489 \mu\text{g TPF g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (PE) and is an indicator of the microbial redox system *in situ*; therefore, it is

Cuadro 4. Matriz de correlación entre las propiedades químicas y bioquímicas.
Table 4. Matrix of correlation between the chemical and biochemical properties

	COS	Nt	C-BM	N-BM	RS	FC	DHa	AAr	GLa	PHa	URa
Nt	0.977**	1									
C-BM	0.849**	0.864**	1								
N-BM	0.947**	0.952**	0.925**	1							
RS	0.818**	0.819**	0.928**	0.890**	1						
FC	0.680*	0.649*	0.814**	0.687*	0.806**	1					
DHa	0.921**	0.949**	0.930**	0.957**	0.936**	0.740**	1				
AAr	0.752**	0.757**	0.890**	0.804**	0.888**	0.876**	0.865**	1			
GLa	0.936**	0.943**	0.913**	0.855**	0.940**	0.764**	0.973**	0.837**	1		
PHa	0.913**	0.929**	0.824**	0.844**	0.940**	0.736**	0.984**	0.872**	0.963**	1	
URa	0.953**	0.935**	0.912**	0.962**	0.904**	0.703**	0.948**	0.763**	0.913**	0.919**	1
PRa	0.919**	0.961**	0.917**	0.951**	0.842**	0.797**	0.988**	0.877**	0.906**	0.983**	0.922**

*Correlación significativa a $p \leq 0.05$; **Correlación significativa a $p \leq 0.01$ (bilateral) ❖ *Significant correlation at $p \leq 0.05$; **Significant correlation at $p \leq 0.01$ (bilateral).

BM, indicando que estas actividades enzimáticas se deben a la BM y están condicionadas por la energía disponible (García *et al.*, 1994; Caravaca *et al.*, 2002). También se encontró una alta correlación entre todas las actividades enzimáticas hidrolasas (URa, PRa, GLa y PHa), lo que sugiere un equilibrio entre los ciclos de los principales nutrientes.

La actividad DHa varió de 22.9 (en TD) a 489 $\mu\text{g TPF g}^{-1} \text{h}^{-1}$ (en PE) y es un indicador del sistema redox microbiano *in situ*; por tanto, se suele considerar un buen indicador de la actividad y biomasa microbiana global edáfica (Alef, 1995). Ésta estuvo altamente correlacionada con otras variables estudiadas y fue mayor en los suelos mejor conservados (PE y PC) y menor en los más degradados (LT y TD), por lo que puede considerarse un indicador de calidad edáfica en este transecto.

En el presente estudio no se detectó AAr en TD, debido a la escasa actividad biológica de estos sustratos. Los mayores valores se presentaron nuevamente en los suelos mejor conservados (1.41 y 1.47 $\mu\text{g NH}_4\text{-N g}^{-1} \text{h}^{-1}$ en PC y PE), donde las condiciones edáficas son óptimas para el desarrollo de una elevada actividad microbiológica. Por tanto, la AAr puede considerarse otro índice de actividad microbiana válido para estos suelos volcánicos. Según Alef y Kleiner (1987) las plantas no pueden usar arginina como fuente de N, mientras que la fauna la amonifica muy lentamente; luego esta variable es adecuada para dar una idea de la actividad microbiana del suelo.

La actividad GLa varió de 11.2 (en TD) a 282 $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ (en PE). Se encontró una alta correlación entre la GLa y el COS ($R=0.936$), dado que esta enzima interviene en la mineralización de los residuos vegetales (Eivazi y Zakaria, 1993). El COS y la GLa aumentaron en los suelos de las zonas más elevadas del transecto, pero este efecto pudo deberse más al tipo de suelo y vegetación imperante que a la altitud. Un mayor contenido de COS sugiere una mayor disponibilidad de energía para la vida microbiana (Eivazi y Zakaria, 1993; García *et al.*, 2000), que a su vez influye en la mineralización de la MOS y las emisiones de CO_2 . Los valores tan bajos en TD se deben al escaso contenido de sustrato orgánico disponible para los microorganismos (García *et al.*, 2000).

Las PHa son enzimas con una baja especificidad y, por tanto, pueden catalizar reacciones de diversos

generally considered a good indicator of global activity and soil microbial biomass (Alef, 1995). This was highly correlated with the rest of the variables studied and was higher in the best preserved soils (PE and PC) and lower in the most degraded (TL and TD), so it can be considered an indicator of soil quality in this transect.

In the present study Aar was not detected in TD due to the low biological activity of these substrates. The highest values were recorded again in the best preserved soils (1.41 and 1.47 $\mu\text{g NH}_4\text{-N g}^{-1} \text{h}^{-1}$ in PC and PE), where soil conditions are optimal for the development of a high microbiological activity. Hence the AAr can be considered another indicator of microbial activity valid for these volcanic soils. According to Alef and Kleiner (1987), plants can not use arginine as a source of N, whereas the fauna ammoniates it very slowly; therefore this variable is appropriate to give an idea of the soil microbial activity.

The GLa activity ranged from 11.2 (in TD) to 282 $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ (in PE). There was a high correlation between the GLa and SOC ($R=0.936$), since this enzyme is involved in the mineralization of plant residues (Eivazi and Zakaria, 1993). The SOC and GLa increased in the transect soils of the highest areas, but this could be due more to the prevailing type of soil and vegetation than to altitude. A higher content of SOC suggests an increased availability of energy for microbial life (Eivazi and Zakaria, 1993, García *et al.*, 2000), which in turn influences the mineralization of SOM and leads to CO_2 emissions. Such low values in TD are due to the low degree of organic substrate available for microorganisms (García *et al.*, 2000).

The PHa's are enzymes having a low specificity and therefore can catalyze reactions of various types of substrate (Alef *et al.*, 1995). The highest PHa activity was observed in PE (3809 $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$), which shows a high content of organic phosphate compounds that induce the synthesis of these enzymes; and the lowest value in TD (164 $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$), due to the low content of C available. The presence of this enzyme is important as it hydrolyzes components of organic P to generate inorganic P available for plants (García *et al.*, 1994). In tepeats the presence of P organic compounds is very limited (Etchevers *et al.*, 1992), hence the low values of PHa in TD.

tipos de sustrato (Alef *et al.*, 1995). La mayor actividad PHa se observó en PE (3809 $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$), lo que muestra un elevado contenido de compuestos fosfatados orgánicos que inducen la síntesis de estas enzimas; y la menor en TD (164 $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$), debido al escaso contenido de C disponible. La presencia de esta enzima es importante ya que hidroliza componentes de P orgánico para generar P inorgánico disponible para las plantas (García *et al.*, 1994). En los tepetates la presencia de compuestos orgánicos de P es muy limitada (Etchevers *et al.*, 1992), de ahí los escasos valores de PHa en TD.

La actividad URa varió significativamente en todos los suelos del transecto, mostrando los menores valores en TD y los mayores en PE (5.3 y 127 $\mu\text{g NH}_4\text{-N g}^{-1} \text{h}^{-1}$). Los bajos valores del TD se explican por su escaso contenido de MOS y la pequeña aportación de materiales orgánicos por la escasa cobertura vegetal (García *et al.*, 2000). Fue también baja en LT debido a las condiciones salinas del suelo, que limitan la actividad microbiana. La mayor actividad URa en PE se debió a una mayor disponibilidad de compuestos orgánicos de N provenientes de los residuos vegetales que el bosque aporta regularmente. Además, la actividad PRa fue significativamente menor en TD y mayor en PE (9.2 y 189 $\mu\text{g tirosina g}^{-1} \text{h}^{-1}$) y estuvo altamente correlacionada con el COS y el Nt ($R=0.919$ y 0.961), sugiriendo que las estructuras polipéptidas (que favorecen la síntesis de PRa) se forman sólo cuando hay un alto contenido de MOS (García *et al.*, 1994). La actividad PRa determinada mediante hidrólisis de caseína corresponde fundamentalmente a proteasas no unidas a coloides órgano-minerales del suelo; por tanto, el uso de sustrato proteínico permite determinar la actividad PRa proveniente de la BM activa y de las enzimas asociadas a residuos celulares (Bonmatí *et al.*, 1998). Concordantemente, la PRa fue elevada en los suelos con mayores valores de BM (PE y PC), lo cual es indicadora de la calidad de los suelos de este transecto.

En resumen, la actividad microbiana aumentó con la altitud de los sitios del transecto, ya que a medida que se asciende la pluviometría es mayor y aumenta la cantidad y diversidad vegetal y, con ello, los aportes orgánicos al suelo que permanecen más tiempo con una humedad óptima. Liu *et al.* (2008) observaron que las diferencias edafoclimáticas a lo largo de un transecto influyeron en la BM y las actividades enzimáticas y, por tanto, en la descomposición

The URa activity varied significantly in all the soils of the transect, showing the lowest values in TD and the highest in PE (5.3 and 127 $\mu\text{g NH}_4\text{-N g}^{-1} \text{h}^{-1}$ respectively). The low values of TD are explained by its low content of SOM and the small contribution of organic materials because of the scant plant cover (García *et al.*, 2000). It was also low in LT due to saline soil conditions that limit microbial activity. The increased URa activity in PE was due to a greater availability of N organic compounds coming from the plant residues produced by the forest regularly. Also, the PRa activity was significantly lower in TD and higher in PE (9.2 and 189 $\mu\text{g tyrosine g}^{-1} \text{h}^{-1}$) and was highly correlated with SOC and Nt ($R=0.919$ and 0.961), suggesting that polypeptide structures (which favor the PRa synthesis) are formed only when there is a high content of SOM (García *et al.*, 1994). The PRa activity determined by casein hydrolysis corresponds primarily to proteases not linked to soil organic mineral colloids; therefore, the use of protein substrate enables to determine the PRa activity coming from active BM and the enzymes associated with cellular residues (Bonmatí *et al.*, 1998). Accordingly, the PRa was higher in the soils with higher values of BM (PE and PC), which is indicative of the quality of such soils.

In summary, microbial activity increased with the altitude of the transect sites, because at a higher altitude rainfall increases as well as the quantity and diversity of vegetation, and thereby the organic contributions to soils, which remained longer with optimum moisture. Liu *et al.* (2008) observed that the soil and climate differences found along the transect affected the BM and enzyme activities and, therefore, on the decomposition of SOM and the nutrient cycle. The effect of vegetation on microbial activity is also important because it is sparse in TD, with few contributions to this substrate. In contrast, in PC and LT there is an important grassland rhizosphere effect, creating an environment rich in microorganisms (although in LT this effect is inhibited by saline conditions). The high contribution of litter in PE and PC favors the abundance of microorganisms (Pajares *et al.*, 2006) and a subsequent higher microbial activity. In PR vegetation is not as abundant as in PC and PE; in addition, the depth of this soil is quite reduced (20-30 cm), which is reflected in a lower microbial activity.

de la MOS y el ciclo de nutrientes. El efecto de la vegetación en la actividad microbiana también es importante, ya que es rala en TD, con escasos aportes a este sustrato. En cambio, en PC y LT hay un importante efecto rizosférico del pastizal, creando un medio enriquecido en microorganismos (aunque en LT dicho efecto es inhibido por las condiciones salinas). El alto aporte de hojarasca en PE y PC favorece la abundancia de microorganismos (Pajares *et al.*, 2006) y, por tanto, la mayor actividad microbiana. En PR la vegetación no es tan abundante como en PC y PE; además, la profundidad de este suelo es bastante reducida (20-30 cm), lo que se refleja en la menor actividad microbiana.

Flujo de CO₂ y su relación con la humedad edáfica y las variables bioquímicas

En la Figura 1 se muestra el FC y la HS mensuales en los sistemas evaluados. La evolución temporal del FC muestra un aumento en los meses más lluviosos (junio-noviembre) y una disminución en los más secos (diciembre-mayo). La intensidad y frecuencia de las precipitaciones durante el verano favorecen la HS y, con ello, la mineralización de la MOS. Li *et al.* (2008) observaron en un ecosistema forestal que el FC fue significativamente mayor en verano y menor en invierno, cuando la precipitación, temperatura y humedad edáficas son más bajas. El tipo de

CO₂ flow and its relationship with soil moisture and the biochemical variables

The monthly FC and HS in the evaluated systems is shown in Figure 1. The temporal evolution of FC shows an increase in the wetter months (June-November) and a decrease in the drier (December-May). The intensity and frequency of rainfall during the summer favor the HS and thus, the mineralization of SOM. Li *et al.* (2008) observed in a forest ecosystem that FC was significantly higher in summer and lower in winter, when precipitation, temperature, and soil moisture are lower. The type of vegetation, the concentration of SOC, climate conditions, and soil microbial activity are factors that interact and influence the recycling of C. The entry of C in the soil subsystem is regulated by the production of biomass by plants, while the losses of this element are induced by the climate and microbial activity that is directly involved in the mineralization of SOM; the losses of C can also be accelerated by deforestation and water erosion (Stevenson and Cole, 1999).

The correlation coefficients in which FC participates were generally significant, but with the lowest values of R (from 0.649 to 0.876) as it is influenced by the environmental conditions of the sampling moment. The general trend shows that the FC was proportional to the content of SOC

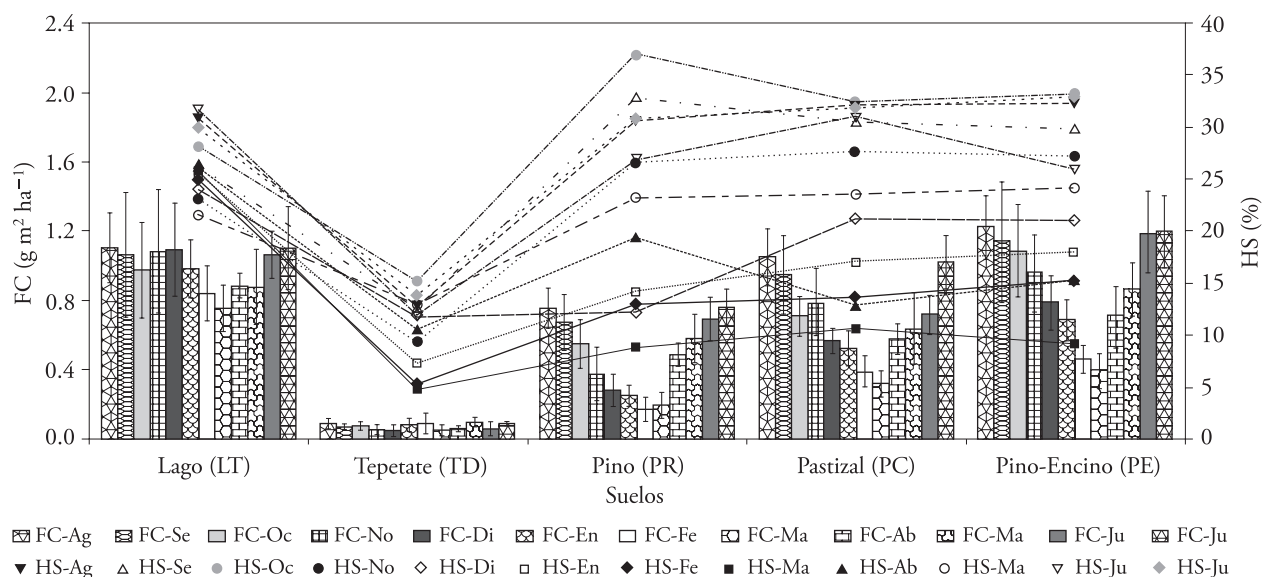


Figura 1. Humedad edáfica (HS) y emisiones de CO₂ (FC) de los suelos del transecto (agosto 2005-julio 2006).

Figure 1. Soil moisture (HS) and CO₂ emissions (FC) of the soils of the transect (August 2005-July 2006).

vegetación, la concentración de COS, las condiciones climáticas y la actividad microbiana edáfica son factores que interactúan entre sí e influyen en el reciclaje de C. La entrada de C en el subsistema edáfico se encuentra regulada por la producción de biomasa por las plantas, mientras que las pérdidas de este elemento son inducidas por el clima y la actividad microbiana, que actúa directamente en la mineralización de la MOS; las pérdidas de C también se pueden acelerar por la deforestación y la erosión hídrica (Stevenson y Cole, 1999).

Los coeficientes de correlación en los que participa el FC fueron, en general, significativos pero con los más bajos valores de R (de 0.649 a 0.876), debido a que está influido por las condiciones ambientales del momento de muestreo. La tendencia general muestra que el FC fue proporcional al contenido de COS ($R=0.680$). Las menores emisiones de CO_2 se dieron en el TD, donde la cantidad de MOS fue muy baja y, por tanto, la actividad microbiana también; y las mayores en los suelos mejor conservados (PE y PC). El FC mostró una alta correlación con la RS ($R=0.806$), dado que ambas variables son indicadores de actividad microbiana edáfica. El FC también tuvo una alta correlación con el C-BM y las actividades enzimáticas; por tanto, una elevada tasa de FC indica altos contenidos de MOS, además de una BM metabólicamente activa, ausente cualquier factor que pudiera inhibir su desarrollo (Wang *et al.*, 2002) y siempre que exista la suficiente humedad edáfica. De todo ello se deduce que el FC es un indicador idóneo para evaluar la calidad de estos suelos, ya que depende del contenido de la MOS, correlacionándose con la BM y la actividad enzimática; además su determinación es sencilla y puede medirse *in situ*, aunque debe tenerse siempre en cuenta las condiciones de humedad edáfica.

CONCLUSIONES

Las propiedades bioquímicas edáficas evaluadas en este trabajo son indicadores útiles para analizar la evolución de los cambios producidos en la calidad de suelos volcánicos mexicanos en diferentes condiciones ambientales. Los diferentes tipos de degradación (erosión y salinización, en TD y LT) en el transecto seleccionado provocaron la disminución de variables bioquímicas edáficas respecto a las zonas mejor conservadas (PE y PC), con mayores aportes de sustratos

($R=0.680$). The lowest CO_2 emissions occurred in the TD, where the amount of SOM was very low and therefore microbial activity as well; and the highest in the best preserved soils (PE and PC). The FC showed a high correlation with RS ($R=0.806$), since both variables are indicators of soil microbial activity. The FC also showed a high correlation with the C-BM and enzyme activities; so a high rate of FC indicates high levels of SOM, in addition to a metabolically active BM, provided there are no other factors that might inhibit its development (Wang *et al.*, 2002), and as long as soil moisture is optimal. On this account, FC is actually a suitable indicator to assess the quality of these soils, as it depends on the content of SOM, which correlates with BM and the enzyme activity; also its determination is simple and can be measured *in situ*, though the conditions of soil moisture must always be taken into account.

CONCLUSIONS

The soil biochemical properties evaluated in this work are useful indicators to analyze the evolution of changes in the quality of Mexican volcanic soils under different environmental conditions. The different types of degradation (erosion and salinization in TD and LT) in the selected transect caused the decrease of soil biochemical variables with respect to the best preserved areas (PE and PC), with higher inputs of organic substrates. The LT salinity and the reduced capacity of water storage, as well as the absence of a plant cover in TD (all of which contribute to increase erosion) cause lower concentrations of SOM and a decrease in biomass and soil microbial activity (reflected in a lower basal respiration and enzyme activity). The CO_2 emissions varied along the transect, being lower in TD and higher in PE and PC, as they depend mainly on the SOM content. However, soil moisture is crucial in these processes, which leads to a higher production of CO_2 emissions during the rainy season (when microbiology activates) provided there is abundant carbonate substrate (as in the most preserved sites of the Tláloc volcano transect).

—End of the English version—



orgánicos. La salinidad del LT y la reducida capacidad de almacenamiento hídrico y la ausencia de cubierta vegetal en el TD (que contribuyen a aumentar la erosión) causan menores contenidos de MOS y, con ello, una disminución de la biomasa y actividad microbiana edáfica (reflejado en una menor respiración basal y actividad enzimática). Las emisiones de CO₂ variaron a lo largo del transecto, siendo menores en el TD y mayores en PE y PC, ya que dependen fundamentalmente del contenido en MOS. Sin embargo, la humedad del suelo es determinante en estos procesos, lo que conlleva a la producción de mayores emisiones de CO₂ en época de lluvia (al activarse la microbiología) siempre que exista abundante sustrato carbonado (como en los sitios más conservados del transecto del volcán Tláloc).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Unión Europea la financiación de esta investigación a través del Proyecto REVOLSO (Programa INCO), al Ministerio de Educación y Ciencia español y al Mr. E. Padilla (Colegio de Postgraduados, México) y al Ing. C. Cruz (INEGI, México) por la ayuda prestada en el estudio botánico y la clasificación de los suelos del transecto.

LITERATURA CITADA

- Alef, K. 1995. Dehydrogenase activity. *In*: Alef, K., and P. Nannipieri (eds). *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press. London. pp: 228-231.
- Alef, K., and D. Kleiner. 1987. Applicability of arginine ammonification as indicator of microbial activity in different soils. *Biol. Fertil. Soils* 5: 148-151.
- Alef, K., P. Nannipieri, and C. Trasar. 1995. Phosphatase activity. *In*: Alef, K., and P. Nannipieri (eds). *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press. London. pp: 335-336.
- Bonmatí, M., B. Ceccanti, and P. Nannipieri. 1998. Protease extraction from soil by sodium pyrophosphate and chemical characterization of the extracts. *Soil Biol. Biochem.* 30: 2113-2125.
- Burns, R. G. 1982. Enzyme activity in soil: location and a possible role in microbial ecology. *Soil Biol. Biochem.* 14: 423-427.
- Bremner, J. M. 1996. Total nitrogen. *In*: Sparks, D. L. (ed). *Methods of Soil Analysis: Chemical Methods*. S.S.S.A. Madison, WI. pp: 1085-1086.
- Caravaca, F., G. Masciandaro, and B. Ceccanti. 2002. Land use in relation to soil chemical and biochemical properties in a semiarid mediterranean environment. *Soil Till. Res.* 68: 23-30.
- Casida, L., D. A. Klein, and R. Santoro. 1964. Soil dehydrogenase activity. *Soil Sci.* 98: 371-378.
- Davidson, E. A., E. Belk, and R. D. Boone. 1998. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Glob. Change Biol.* 4: 217-227.
- Dick, R. P., D. Breakwell, and R. Turco. 1996. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrating biological indicators. *In*: Doran J. W., and A. J. Jones (eds). *Handbook of Methods for Assessment of Soil Quality*. S.S.S.A. Madison, WI. pp: 247-272.
- Eivazi, F., and A. Zakaria. 1993. β -glucosidase activity in soils amended with sewage sludge. *Agric. Ecosyst. Environ.* 43: 155-161.
- Etchevers B., J. D., y R. Ferrera-Cerrato. 1994. Fertilidad de los suelos volcánicos endurecidos: características químicas y microbiológicas de los tepetates en México. *Transactions 15th World Congress of Soil Science*. Acapulco. Vol 6A: 571-591.
- Etchevers B., J. D., C. Hidalgo M., C. Prat, and P. Quantin. 2006. Tepetates of Mexico. *In*: Lal, R. (ed). *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker. New York. pp: 1745-1748.
- Etchevers B., J. D., C. Zebrowski, C. Hidalgo M., y P. Quantin. 1992. Fertilidad de los tepetates II. Situación del fósforo y del potasio en tepetates de México y Tlaxcala (México). *Terra* 10: 385-391.
- Gama-Castro, J., E. Solleiro-Rebolledo, D. Flores-Román, S. Sedov, H. Cabadas-Báez, y J. Díaz-Ortega. 2007. Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del Glacis de Buenavista, Morelos. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 59: 133-145.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Adaptación a las Condiciones de la República Mexicana. 4ª ed. Instituto de Geografía, UNAM. México D. F. 246 p.
- García, C., T. Hernández, F. Costa, and B. Ceccanti. 1994. Biochemical parameters in soils regenerated by the addition of organic wastes. *Waste Manage. Res.* 12: 457-466.
- García, C., T. Hernández, J. A. Pascual, J. L. Moreno, y M. Ros. 2000. Actividad microbiana en suelos del Sureste sometidos a procesos de degradación y desertificación. Estrategias para su rehabilitación. *In*: García, C., y T. Hernández (eds). *Investigación y Perspectivas de la Enzimología de Suelos en España*. CEBAS-CSIC. Murcia. pp: 43-92.
- Haynes, R. J. 2000. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biol. Biochem.* 32: 211-219.
- Hernández, T., y C. García. 2003. Estimación de respiración microbiana del suelo. *In*: García, C., F. Gil S., T. Hernández, y C. Trasar C. (eds). *Técnicas de Análisis de Parámetros Bioquímicos en Suelos*. Mundi-Prensa. Madrid. pp: 311-346.
- Joergensen, R. G., and P. C. Brookes. 1990. Ninhydrin-reactive nitrogen measurements of microbial biomass in 0.5 M K₂SO₄ soil extracts. *Soil Biol. Biochem.* 22: 1023-1027.
- Joergensen, R. G., and X. Castillo. 2001. Interrelationships between microbial and soil properties in young volcanic ash soils of Nicaragua. *Soil Biol. Biochem.* 33: 1581-1589.
- Ladd, J. N., and J. H. Butler. 1972. Short-term assay of soil proteolytic enzyme activities using proteins and dipeptide derivatives as substrates. *Soil Biol. Biochem.* 4: 19-30.
- Li, X. Z., and Z. Z. Chen. 2004. Soil microbial biomass C and N along a climatic transect in the Mongolian steppe. *Biol. Fertil. Soils* 39: 344-351.

- Li, Y. L., D. Otieno, K. Owen, Y. Zhang, J. Tenhunen, X. Q. Rao, and Y. B. Lin. 2008. Temporal variability in soil CO₂ emission in an orchard forest ecosystem. *Pedosphere* 18: 273-283.
- Liu, X. M., Q. Li, W. J. Liang, and Y. Jiang. 2008. Distribution of soil enzyme activities and microbial biomass along a latitudinal gradient in farmlands of Songliao Plain, Northeast China. *Pedosphere* 18: 431-440.
- Murata, T., N. Nagaishi, R. Hamada, H. Tanaka, K. Sakagami, and T. Kato. 1998. Relationship between soil neutral sugar composition and the amount of labile soil organic matter in Andisol treated with bark compost of leaf-litter. *Biol. Fert. Soils* 27: 342-348.
- Nannipieri, P., B. Ceccanti, S. Cervelli, and E. Matarrese. 1980. Extraction of phosphatase, urease, protease, organic carbon and nitrogen from soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 1011-1016.
- Nelson, D. W., and L. E. Sommers. 1996. Total C, organic C and organic matter. *In*: Sparks, D. L. (ed). *Methods of Soil Analysis: Chemical Methods*. S.S.S.A. Madison, WI. pp: 961-1010.
- Pajares M., S., R. Ferrera-Cerrato, y J. F. Gallardo L. 2006. Influencia de la degradación de los suelos volcánicos mexicanos en la población microbiana. *In*: Gallardo L., J. F. (ed). *Medioambiente en Iberoamérica: Visión desde la Física y la Química en los Albores del Siglo XXI*. SiFyQA. España. pp: 341-350.
- Pajares M., S. 2008. Cambios en la dinámica del N y la actividad microbiana de suelos volcánicos del altiplano mexicano por diferentes impactos antrópicos. Tesis Doctoral. Salamanca. España. 349 p.
- Pascual, J. A., C. García, T. Hernández, J. L. Moreno, and M. Ros. 2000. Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes. *Soil Biol. Biochem.* 32: 1877-1883.
- Powlson, D. S., P. C. Brookes, and B. T. Christensen. 1987. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biol. Biochem.* 19: 159-164.
- Salamanca, E. F., M. Raubuch, and R. G. Joergensen. 2002. Relationships between soil microbial indices in secondary tropical forest soils. *Appl. Soil Ecol.* 35: 328-337.
- Stevenson, F. J., and M. A. Cole. 1999. *Cycles of Soil*. 2nd ed. John Wiley & Sons. New York. 427 p.
- Tabatabai, M. A. 1994. Soil enzymes. *In*: Weaver, R. W., J. S. Angle, P. S. Bottomly, D. Bezdicsek, S. Smith, M. A. Tabatabai, and A. Wollum (eds). *Methods of Soil Analysis: Microbial and Biochemical Properties*. S.S.S.A. Madison, WI. pp: 775-833.
- Vance, E. D., P. C. Brookes, and D. S. Jenkinson. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.* 19: 703-707.
- Wang, G. X, J. Qian, G. Y. Cheng, and Y. M. Lai. 2002. Soil organic carbon pool of grassland soils on the Qinghai-Tibetan Plateau and its global implication. *Sci. Total Environ.* 291: 207-217.
- Wang, W. J., R. C. Dalal, P. W. Moody, and J. Smith. 2003. Relationships of soil respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content. *Soil Biol. Biochem.* 35: 273-284.
- Zebrowski, C. 1992. Los suelos volcánicos endurecidos de América Latina. *Terra* 10: 15-23.