

VARIABILIDAD ESPACIAL DE PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO EN UN SISTEMA LAMA-BORDO EN LA MIXTECA ALTA DE OAXACA, MÉXICO

SPATIAL VARIABILITY OF PHYSICAL AND CHEMICAL SOIL PROPERTIES IN A LAMA-BORDO SYSTEM IN THE HIGH MIXTEC REGION OF OAXACA, MÉXICO

Blanca E. **Santiago-Mejía**¹, Mario R. **Martínez-Menez**^{1*}, Erasmo **Rubio-Granados**¹,
Humberto **Vaquera-Huerta**², Julio **Sánchez-Escudero**³

¹Hidrociencias, ²Estadística, ³Agroecología y Sustentabilidad. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km. 36.5, Montecillo, Estado de México. 56230. México. (estelasanme@gmail.com)(mmario@colpos.mx)(erubio@colpos.mx) (hvaquera@colpos.mx)(sanchezej@colpos.mx)

RESUMEN

Los ecosistemas de la región Mixteca han estado sometidos a la deforestación, el sobrepastoreo y prácticas agrícolas inadecuadas, y como resultado los suelos se han degradado. Para atenuar este problema, desde tiempos ancestrales los pueblos mixtecos han establecido el sistema lama-bordo como estrategia para retener suelo, manejar los escurrimientos superficiales y retener humedad. Para tener evidencia de la efectividad del sistema lama-bordo se analizó la variabilidad espacial de las propiedades físicas (textura, densidad aparente, capacidad de campo y punto de marchitez permanente) y químicas (pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio y carbono orgánico) de los suelos retenidos en un sistema en el municipio de Teotongo, Oaxaca; este sistema tiene 8.47 ha distribuidas en 11 parcelas donde se tomaron muestra de suelos a 0.30 m de profundidad. Las propiedades físicas y química de los suelos muestran alta variabilidad espacial relacionada con la posición del muestreo y la antigüedad de la terraza. El análisis estadístico mostró diferencias estadísticamente significativas ($\alpha < 0.05$) en los contenidos de materia orgánica, nitrógeno, potasio, carbono orgánico, arcilla, capacidad de retención de agua y conductividad hidráulica entre las márgenes derecha, izquierda y central y la antigüedad en la construcción de las parcelas.

Palabras clave: degradación de suelo, carbono orgánico y calidad de suelo, lama-bordo, obra de conservación, retención de suelo.

ABSTRACT

Ecosystems of the Mixtec region have been subjected to deforestation, overgrazing, and inadequate agricultural practices, and as a result soils have become deteriorated. In order to alleviate this problem, since ancestral times, the Mixtec peoples have established the lama-bordo system as a strategy to retain soil, manage superficial runoff and retain moisture. In order to have evidence of the effectiveness of the lama-bordo system, the spatial variability was analyzed, of the physical properties (texture, apparent density, field capacity and permanent wilting point) and chemical properties (pH, organic matter, nitrogen, phosphorus, potassium, and organic carbon) of the soils retained in a system in the municipality of Teotongo, Oaxaca; this system has 8.47 ha distributed in 11 plots where soil samples were taken at a depth of 0.30 m. The physical and chemical properties of the soils show high spatial variability related to the position of the sample and the age of the terrace. The statistical analysis showed statistically significant differences ($\alpha < 0.05$) in the contents of organic matter, nitrogen, potassium, organic carbon, clay, capacity for water retention, and hydraulic conductivity between the right, left and central margins, and the age of construction of the plots.

Keywords: soil degradation, organic carbon and soil quality, lama-bordo, conservation construction, soil retention.

INTRODUCTION

It is estimated that in México, more than 43 % of soils present different degrees of deterioration that range from slight to extreme, provoked by the human action from changes in land use, overgrazing and tilling systems; 36.6 % of the soils present hydric

* Autor responsable ✦ Author for correspondence.

Recibido: julio, 2016. Aprobado: junio, 2017.

Publicado como ARTÍCULO en ASyD 15: 275-288. 2018.

INTRODUCCIÓN

Se estima que en México más de 43 % de los suelos presentan diferentes grados de degradación que varían de ligero a extremo, provocado por la acción humana por cambios en el uso del suelo, el sobrepastoreo y los sistemas de laboreo; 36.6 % de los suelos presentan erosión hídrica que se manifiesta en la pérdida de la capa superficial (25.3 %), deformaciones del terreno (11.6 %) y sedimentación (0.6 %) (SEMANART-CP, 2003). En Oaxaca, la SEMARNAT-CP (2003) ubica 1 675 321 hectáreas de la superficie del estado afectada por erosión hídrica, con 95 % con la pérdida de la capa superficial y el resto con deformaciones del terreno.

Diversos estudios ubican a la Mixteca como la región con el mayor grado de erosión de los suelos a nivel mundial y reconocen que lo que era una zona cubierta con bosque fue deforestada paulatinamente, lo que propició el deterioro de los suelos que se agravó con la introducción de la ganadería caprina, la sobreexplotación de los recursos forestales (para madera, carbón y durmientes), que provocó la degradación acelerada de los suelos, dejando laderas con afloramiento del material parental, pérdida de superficie cultivable, en la época de la colonia, el abandono de las prácticas tradicionales de producción agrícola y la migración (Martínez, 2006; Rivas, 2008; Nuñez and Marten, 2013).

La pérdida de superficie cultivable y la creciente demanda de alimentos por la población obligaron a los productores mixtecos, desde la época prehispánica, a aprovechar las escorrentías y la erosión para favorecer la creación de áreas para la producción de cultivos, mediante la construcción de bordos transversales a la dirección del flujo del agua en los arroyos con los que captaban el suelo erosionado proveniente de las partes altas durante el escurrimiento estacional y retenían el agua de escorrentía; regional y localmente a este sistema se le conoce como: trincheras, atajadizos, ahoyados, enlamados, jollas y lama-bordo (Rivas *et al.*, 2008). Estos espacios agrícolas actualmente son utilizados para la producción de una gran variedad de cultivos, importantes en la dieta de los pobladores de estas regiones; destaca el maíz de cajete (busca jugo o humedad), el cual ha sido seleccionado y adaptado ancestralmente. En estos sistemas la superficie de las parcelas por productor varía de 0.25 a más de una hectárea; pueden alcanzar hasta cuatro

erosion manifested in the loss of the superficial layer (25.3 %), deformations of the terrain (11.6 %) and sedimentation (0.6 %) (SEMANART-CP, 2003). In Oaxaca, SEMARNAT-CP (2003) describes 1 675 321 hectares of the surface of the state as affected by hydraulic erosion, with 95 % with loss of the superficial layer and the rest with deformations of the terrain.

Various studies place the Mixtec region as the one with the highest degree of erosion of the soils worldwide, and recognize that what was once a zone covered with forest was gradually deforested, causing the deterioration of the soils which was aggravated with the introduction of goat breeding, overexploitation of forest resources (for wood, carbon and sleepers), provoking the accelerated degradation of soils, leaving hillsides with emergence of parental material, loss of arable surface, in Colonial times, abandonment of traditional practices of agricultural production, and migration (Martínez, 2006; Rivas, 2008; Nuñez and Marten, 2013).

The loss of arable surface and the growing demand for foods by the population forced Mixtec producers, since Pre-Hispanic times, to take advantage of the runoffs and the erosion to favor the creation of areas for crop production, through the construction of *bordos* (barriers) that are transversal to the water flow direction in the streams, with which the eroded soil from the high parts was captured during seasonal runoffs, and which retained runoff water. Regionally and locally, this system is known as: trenches, *atajadizos*, *ahoyados*, *enlamados*, *jollas* and *lama-bordo* (Rivas *et al.*, 2008). These agricultural spaces are currently used for the production of a large variety of crops, important in the diet of the inhabitants of these regions; *cajete* maize stands out (it seeks juice or moisture), which has been selected and adapted ancestrally. In these systems the surface of the plots per producer varies from 0.25 to more than one hectare; they can reach up to four kilometers of length with variable widths on the ravines (Galindo, 2008; Rivas *et al.*, 2006; Spores *et al.*, 2008; Pérez and Anderson, 2006), with a depth of up to 11.50 m and an approximate age of 3,400-3,500 years, described as a strategy of adaptive management to take advantage of the nutrients, water, sediments and vegetation, within a context of human and climate pressures (Mueller *et al.*, 2012; Leigh *et al.*, 2013).

kilómetros de longitud con anchos variables sobre las barrancas (Galindo, 2008; Rivas *et al.*, 2006; Spores *et al.*, 2008; Pérez y Anderson, 2006), con una profundidad de hasta 11.50 m y una antigüedad aproximada de 3,400-3,500 años, descritos como una estrategia de manejo adaptativo para aprovechar los nutrientes, agua, sedimentos y vegetación, en un contexto de presiones humanas y climáticas (Mueller *et al.*, 2012; Leigh *et al.*, 2013).

En el sistema lama-bordo existe gran variabilidad de las propiedades físicas y químicas de los suelos por la antigüedad en la construcción de las terrazas y el grado de pendiente del terreno donde se establece, como lo reportaron Moore *et al.* (1993), quienes señalan que la pendiente y los perfiles de humedad son factores del terreno altamente correlacionados con la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas de los suelos.

Kreznor *et al.* (1989) y Pachepsky *et al.* (2001) mencionan que las geoformas y la topografía definen los patrones de flujo del agua y sedimentos, cuya magnitud está asociada con la altitud, gradiente y forma de la pendiente; estos factores influyen en la dinámica de las propiedades físicas y químicas del suelo, la productividad de la tierra y la producción de alimentos; por lo tanto, afecta directamente los rendimientos (Mzuku *et al.*, 2005). Ceddia *et al.* (2009) identifican al relieve como un factor con alta correlación en la variabilidad espacial de las propiedades físicas de los suelos, especialmente con las fracciones de limos, densidad aparente, capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente. Arnhold *et al.* (2015) estudiaron cómo los cambios en el uso y manejo de los cultivos afectan las propiedades físicas y químicas de los suelos en las laderas encontraron que la variabilidad espacial está asociada con la pendiente y el material geológico; las prácticas de manejo de cultivos agrícolas tienden a incrementar la densidad aparente, reducen la conductividad hidráulica, la capacidad de almacenamiento y los niveles de carbono y nitrógeno de los suelos.

El estudio de la variabilidad espacial de las propiedades de los suelos agrícolas es importante para la toma de decisiones adecuadas de manejo para mejorar su calidad (Rosemary *et al.*, 2016); conocer la fuente de variación ayudaría a una mayor eficacia (Mzuku *et al.*, 2005) y así poder contar con una agricultura de precisión (Wang *et al.*, 2013). Los mapas digitales detallados del suelo muestran la heterogeneidad espacial de las propiedades del

In the lama-bordo system, there is great variability of the physical and chemical properties of the soils due to the age of construction of the terraces and the degree of the terrain's slope where they are established, as reported by Moore *et al.* (1993), who point out that the slope and the moisture profiles are factors of the terrain highly correlated to the spatial variability of the physical and chemical properties of the soils.

Kreznor *et al.* (1989) and Pachepsky *et al.* (2001) mention that geological formations and topography define the patterns of water flow and sediments, whose magnitude is associated to the altitude, gradient and shape of the slope; these factors influence the dynamics of the physical and chemical properties of the soil, the land productivity, and the production of foods; therefore, they affect the yields directly (Mzuku *et al.*, 2005). Ceddia *et al.* (2009) identify the relief as a factor with high correlation in the spatial variability of the physical properties of soils, especially with the silt fractions, apparent density, field capacity and permanent wilting point. Arnhold *et al.* (2015) studied how changes in the use and management of the crops affect the physical and chemical properties of the soils on the hillsides found that the spatial variability is associated to the slope and the geological material; the practices of agricultural crop management tend to increase the apparent density, reduce the hydraulic conductivity, the storage capacity, and the levels of carbon and nitrogen of the soils.

The study of spatial variability of the properties of agricultural soils is important for adequate management decision making to improve their quality (Rosemary *et al.*, 2016); understanding the source of variation would help a higher efficacy (Mzuku *et al.*, 2005) and thus to be able to have precision agriculture (Wang *et al.*, 2013). The detailed digital maps of the soil show the spatial heterogeneity of the soil properties, necessary for the specific management of the soil and the plants (Rosemary *et al.*, 2016; Campbell, 1979; Mzuku *et al.*, 2005; Dercon *et al.*, 2003).

The time of intervention in the soil alters the properties, depending on the duration and type of tilling (Kilic *et al.*, 2012); the spatial variability has a strong relation with the use that is given to the land (Wang *et al.*, 2013). There are different levels of variability according to the land use (Mzuku *et al.*,

suelo, necesarios para el manejo específico del suelo y las plantas (Rosemary *et al.*, 2016; Campbell, 1979; Mzuku *et al.*, 2005; Dercon *et al.*, 2003).

El tiempo de intervención en el suelo altera las propiedades, dependiendo de la duración y tipo de labranza (Kilic *et al.*, 2012); la variabilidad espacial tiene una fuerte relación con el uso que se le dé a la tierra (Wang *et al.*, 2013). Existen diferentes niveles de variabilidad de acuerdo con el uso de suelo (Mzuku *et al.*, 2005); el análisis de lo anterior confirma y cuantifica la disminución en la variabilidad de las propiedades del suelo desde depósitos jóvenes a antiguos, mostrando así un incremento de la homogeneización del suelo con el tiempo (Saldaña *et al.*, 1998). En el caso de las terrazas, la fertilidad del suelo muestra un gradiente diferencial de la parte superior a la parte inferior (Dercon *et al.*, 2003).

Los sistemas lama-bordo son estrategias efectivas para la acumulación de suelo fértil para la agricultura y la conservación del suelo y agua. Los bordos de piedra, tierra o vegetación construidos a través del tiempo sobre las barrancas favorecen la acumulación de suelo; sin embargo, el aporte continuo de materiales y la antigüedad del sistema genera variaciones temporales y espaciales de las propiedades física, química e hidrológica de los suelos.

El objetivo de esta investigación fue analizar la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas del suelo en cuanto a su posición dentro de las terrazas y la antigüedad de las mismas en un sistema lama-bordo en el municipio de Teotongo, Oaxaca. Se espera que los patrones de distribución espacial de estas propiedades permitan hacer inferencias sobre la calidad de los suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El sistema lama-bordo en estudio está ubicado en el municipio de Teotongo en la región Mixteca Alta, Oaxaca en las coordenadas 17° 45' 45" N y 97° 31' 41" O, a una altitud de 2115 m. El clima del sitio es templado subhúmedo con lluvias en verano, con una temperatura media anual de 16.6 °C; la precipitación media anual es de 492 mm y la evaporación de 2799 mm. Es una zona semiárida con restricciones para la producción de cultivos en temporal por la variación estacional de la lluvia que, en años secos, es insuficiente para cubrir las demandas de los cultivos. El

(2005); the analysis of this confirms and quantifies the decrease in variability of the soil properties from young to ancient deposits, thus showing an increase of the homogenization of the soil with time (Saldaña *et al.*, 1998). In the case of the terraces, soil fertility shows a differential gradient from the higher part to the lower part (Dercon *et al.*, 2003).

The lama-bordo systems are effective strategies for the accumulation of fertile soil for agriculture and conservation of soil and water. The rock, land or vegetation *bordos* built throughout time on the ravines favor soil accumulation; however, the continuous contribution of materials and the age of the system generate temporal and spatial variations of the physical, chemical and hydrological properties of the soils.

The objective of this research was to analyze the spatial variability of physical and chemical properties of the soil, in terms of their position within the terraces and their age in a lama-bordo system in the municipality of Teotongo, Oaxaca. It is expected that the patterns of spatial distribution of these properties allow making deductions about the quality of the soils.

MATERIALS AND METHODS

Study site

The lama-bordo system under study is located in the municipality of Teotongo in the High Mixtec region, Oaxaca, on coordinates 17° 45' 45" N and 97° 31' 41" W, at an altitude of 2115 m. The site's climate is sub-humid temperate with summer rains, with a mean annual temperature of 16.6 °C; the mean annual precipitation is 492 mm and the evaporation is 2799 mm. It is a semiarid zone with restrictions for the production of rainfed crops due to the seasonal variation of rain, which in dry years is insufficient to cover the demands from the crops. The dominant soil group is epileptic Phaeozem, which are shallow, subject to erosion, parental material emergence, and low moisture retention capacity. With the construction of the *bordos*, the eroded materials accumulate, forming deep colluvial soils in the central part and shallow on the right and left margins.

The system has 11 plots (terraces) with surfaces that vary from 0.22 to 1.32 ha on a total surface of

grupo dominante de suelo es el Phaeozem epiléptico que son poco profundos, sujetos a la erosión, afloramiento de material parental y baja capacidad de retención de humedad. Con la construcción de los bordos, los materiales erosionados se acumulan formando suelos coluviales profundos en la parte central y someros en las márgenes derecha e izquierda.

El sistema consta de 11 parcelas (terrazas) con superficies que varían de 0.22 a 1.32 ha en una superficie total de 8.47 ha (Figura 1); se agruparon por antigüedad en: joven (P1, P2 y P3), media (P4, P5, P6 y P7) y vieja (P8, P9, P10 y P11). Las de la parte baja son las de mayor antigüedad, tienen bordos más altos y muestran crecimiento lateral por la incorporación de nuevas fracciones de terreno en ambas márgenes de las laderas.

Muestreo de suelos y análisis de laboratorio

Se realizó un muestreo preliminar de los suelos, a 0.30 m de profundidad, para conocer la eficiencia del sistema lama-bordo en el mejoramiento de las propiedades del suelo, en relación con terrenos con laboreo tradicional y en descanso.

Para la variabilidad espacial el muestreo se realizó a 0.30 m de profundidad en las márgenes derecha, izquierda y central de cada parcela del sistema; los puntos de muestreo se ubicaron con Geoposicionador Satelital (GPS). Las muestras de suelos fueron colocadas en bolsas de plásticos para su traslado y

8.47 ha (Figure 1); they were grouped by age into: young (P1, P2 and P3), middle (P4, P5, P6 and P7) and old (P8, P9, P10 and P11). Those in the low part are the oldest, have higher *bordos* and show lateral growth from the incorporation of new fractions of land in both margins of the hillsides.

Soil sampling and laboratory analysis

A preliminary sampling of the soils was carried out, at 0.30 m of depth, to understand the efficiency of the lama-bordo system in improving the soil properties, in relation to lands with traditional tilling and at rest.

For spatial variability, the sampling was carried out at 0.30 m of depth on the right, left and central margins of each plot in the system; the sampling points were located with a Global Positioning System (GPS). The soil samples were placed in plastic bags for their transport and processing in the laboratory; the methods used in the analysis of the properties are shown in Table 1.

Digital elevation model

A total station topographic appraisal was carried out (Sokkia SET 630 R) of the *bordos* of each terrace; the readings were taken every 10 meters on the high part and low part of each *bordo* to obtain the

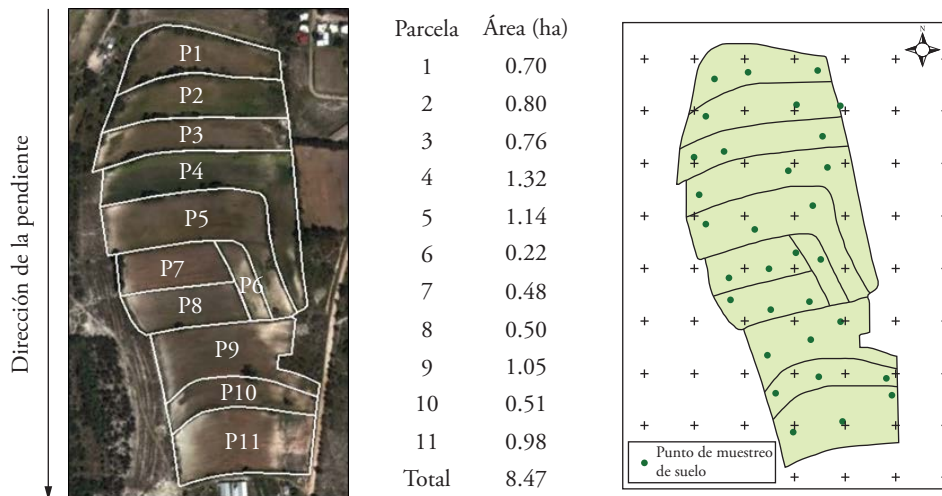


Figura 1. Parcelas del sistema de lama-bordo y sitios de muestreo en Teotongo, Oaxaca.
 Figure 1. Plots of the lama-bordo system and sampling sites in Teotongo, Oaxaca.

procesamiento en laboratorio; los métodos utilizados en el análisis de las propiedades se muestran en el Cuadro 1.

Modelo digital de elevación

Se realizó un levantamiento topográfico con estación total (Sokkia SET 630 R) de los bordos de cada terraza; las lecturas se tomaron a cada 10 metros en la parte alta y baja de cada bordo para obtener el desnivel entre parcelas y estimar la altura de la terraza. El Modelo Digital de Elevación (MDE) del sistema se elaboró con los datos de este levantamiento.

Análisis de los datos

Para analizar el comportamiento espacial de los parámetros físicos y químicos de los suelos se utilizó la ubicación geográfica de los puntos de muestreo, el MDE y los valores puntuales para cada parámetro, y se interpolaron con la herramienta de Kygring en Arc GIS 10.2.2.

En el análisis estadístico se obtuvieron los descriptores estadísticos de cada propiedad y se agruparon por posición de muestreo y antigüedad; con el programa Minitab 17 se realizó el análisis de varianza (ANOVA) y la comparación de medias con la prueba de Tukey.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los datos obtenidos en el levantamiento topográfico el sistema tiene un desnivel promedio de 4 %; existe una diferencia en elevación de

incline between plots and to estimate the height of the terrace. The Digital Elevation Model (DEM) of the system was elaborated with the data from this appraisal.

Data analysis

To analyze the spatial behavior of the physical and chemical parameters of the soils, the geographic location of the sampling points was used, the DEM and the specific values for each parameter, and they were interpolated with the Kygring tool in Arc GIS 10.2.2.

The statistical descriptors of each property were obtained in the statistical analysis, and they were grouped by position of sampling and age; the analysis of variance (ANOVA) and means comparison with the Tukey test were carried out with the Minitab 17 software.

RESULTS AND DISCUSSION

According to the data obtained in the topographic appraisal, the system has an average incline of 4 %; there is a difference in incline of 20 m in the 480 m of length. With the construction of *bordos*, a gradual process of terrace formation begins, which currently has an average incline of nearly two meters between plots. The results show that the lama-bordo system is an efficient system in sediment retention and improves soil fertility, with values in its physical and chemical parameters similar to lands at rest that are not subject to any

Cuadro 1. Propiedades del suelo, escalas de medición y métodos de determinación.
Table 1. Soil properties, measurement scales, and determination methods.

Propiedad	Escala	Método
Textura		Hidrómetro de Bouyoucos (Bouyoucos, 1962)
Densidad aparente	Mg m ⁻³	Método de la parafina (Blake, 1965)
Capacidad de campo	Porcentaje	Olla de presión (Klute, 1986)
Punto de marchitez permanente	Porcentaje	Membrana de presión (Klute, 1986)
Conductividad hidráulica	mm h ⁻¹	Permeámetro de carga constante (Klute y Dirksen, 1965)
pH	log	Potenciometría (1:1) (Willard et al., 1974)
Materia orgánica	Porcentaje	Walkley y Black (Walkley y Black, 1934)
Nitrógeno total	Porcentaje	Kjehdahl (modificado por Bremner, 1965)
Fósforo	mg kg ⁻¹	Olsen (Olsen et al., 1954)
Potasio	cmol kg ⁻¹	Acetato de Amonio (Pratt, 1965)
Capacidad de intercambio catiónico	cmol kg ⁻¹	Acetato de Amonio (Chapman, 1965)
Carbono Orgánico Total	Mg ha ⁻¹	Estimado (González et al., 2008)

Cuadro 2. Propiedades del suelo en tres sistemas de manejo.**Table 2. Soil properties in three management systems.**

Sistema	pH	N	P	K	MO	C	ARC	Limo	ARE	DA	CC	PMP	HA
Testigo	7.96a	81.27a	2.17a	1.38a	3.72a	85.71a	38.62a	26.82ab	34.56a	1.30a	36.45a	19.75a	16.70a
Lama-Bordo	7.97a	51.44a	1.51a	1.34a	2.37a	54.25a	36.03a	21.37b	42.61a	1.33a	28.42a	17.02a	11.40a
Convencional	7.86a	41.46a	1.09a	0.59a	1.97a	43.73a	41.16a	36.91a	21.93a	1.27a	32.98a	19.96a	13.02a

20 m en los 480 m de longitud. Con la construcción de los bordos se inicia un proceso paulatino de formación de terrazas, que actualmente tienen un desnivel promedio cercano a los dos metros entre parcelas. Los resultados muestran que el sistema lama-bordo es un sistema eficiente en la retención de sedimentos y mejora la fertilidad del suelo, con valores en sus parámetros físicos y químicos similares a terrenos en descanso que no están sujetos a ningún uso y superiores a los terrenos con agricultura convencional (Cuadro 2).

Variabilidad de las propiedades físicas del sistema lama-bordo

Los resultados muestran altos coeficientes de correlación entre la antigüedad terrazas y los contenidos de limo (0.7350, $p < 0.0001$), materia orgánica (0.5220, $p = 0.0026$), CE (0.41652, $p = 0.0198$) y conductividad hidráulica (0.40964, $p = 0.0221$). Las terrazas más viejas del lama-bordo han tendido más tiempo para retener nutrimentos y se han iniciado procesos de agregación que inciden en la conductividad hidráulica. El porcentaje de K y DAP tienen una correlación negativa (0.5320 y 0.5128); los valores más altos de estas propiedades se encuentran en las parcelas jóvenes. La reducción del contenido de potasio puede deberse a una mayor acumulación de calcio en el complejo de intercambio.

La posición muestra altos coeficientes de correlación con el contenido de arcillas ($p = 0.0002$), CC ($p = 0.0003$), PMP ($p = 0.0005$) y COS ($p = 0.0012$). El centro de las parcelas sigue conservando la línea de flujo del agua y a pesar de los bordos no hay suficiente tiempo para la sedimentación de las arcillas; este comportamiento afecta la capacidad de retención de humedad de sistema.

La textura promedio de los suelos en el sistema lama-bordo es franco arcillo-arenoso, con contenidos de arcilla, limo y arena de 32.65 %, 18.32 % y 49.03 %, respectivamente, y coeficientes de variación (CV) de 29.14 %, 31.27 % y 15.44 %; la

use and higher than terrains with conventional agriculture (Table 2).

Variability of the physical properties of the lama-bordo system

Results show high correlation coefficients between terrace age and silt contents (0.7350, $p < 0.0001$), organic matter (0.5220, $p = 0.0026$), CE (0.41652, $p = 0.0198$) and hydraulic conductivity (0.40964, $p = 0.0221$). The oldest lama-bordo terraces have had more time to retain nutrients and aggregation processes have begun which influence the hydraulic conductivity. The percentage of K and DAP have a negative correlation (0.5320 and 0.5128); the highest values of these properties are found in the young plots. The reduction of the potassium content can be due to a greater accumulation of calcium in the exchange complex.

The position shows high correlation coefficients with the clay content ($p = 0.0002$), FC ($p = 0.0003$), PWP ($p = 0.0005$) and SOC ($p = 0.0012$). The center of the plots continues conserving the water flow line and despite the *bordos* there is not enough time for the sedimentation of clays; this behavior affects the system's capacity for moisture retention.

The average texture of the soils in the lama-bordo system is clay-sandy loam, with clay, silt and sand contents of 32.65 %, 18.32 % and 49.03 %, respectively, and variation coefficients (VC) of 29.14 %, 31.27 % and 15.44 %; the soil fraction composition suggests that when sand contents dominate, better conditions for moisture storage in the profile are generated, and water infiltration into the soil is favored. The field capacity (FC) varies between 20 and 41 %, with an average of 31.7 % and VC of 16.75; the permanent wilting point (PWP) varies between 5 and 30 %, with average values of 20.1 and VC of 25.7 %. The hydraulic conductivity has average values of 4.72 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, with a negative correlation with the silt content. The behavior of the

composición granulométrica sugiere que al dominar los contenidos de arenas se generan mejores condiciones para el almacenamiento de humedad en el perfil y favorecen la infiltración del agua en el suelo. La capacidad de campo (CC) varía entre 20 y 41 %, con un promedio de 31.7 % y CV de 16.75; el punto de marchitez permanente (PMP) varía entre 5 y 30 %, con valores promedio de 20.1 y CV de 25.7 %. La conductividad hidráulica tiene valores promedio de 4.72 mm·h⁻¹, con una correlación negativa con el contenido de limo. El comportamiento de las propiedades hidráulicas muestra la variabilidad espacial en la capacidad de almacenamiento de humedad en el suelo, lo que puede ocasionar un crecimiento diferencial de los cultivos y obliga a generar estrategias de manejo para mantener un crecimiento más uniforme. La densidad aparente tiene valores relativamente altos, 1.47 Mg m⁻³ característicos de materiales de sedimentación con escasa influencia de procesos pedogenéticos y sujetos a compactación por el peso de los materiales que se aportan continuamente (Cuadro 3 y Figura 2).

El ANOVA mostró diferencias altamente significativas ($\alpha=0.05$) para los márgenes en los contenidos de arcilla, arena, CC y PMP (Cuadro 3), lo que sugiere que con el manejo del sistema y la roturación del suelo se incorporan nuevos materiales que modifican el comportamiento textural por el crecimiento lateral de las terrazas. Las márgenes cambian su composición granulométrica y en la parte central tienden a acumularse las fracciones más finas; esto coincide con lo reportado por Sullivan (2000) para sistemas de agricultura de escurrimientos en el Suroeste de Estados Unidos, donde reporta que existen cambios en los patrones texturales en las parcelas con manejo de escurrimientos. Para limos y densidad

hydraulic properties show spatial variability in the capacity of moisture storage in the soil, which can cause a differential growth of the crops and compel to generating management strategies to maintain a more uniform growth. The apparent density has relatively high values, 1.47 Mg m⁻³ characteristic of sedimentation materials with scarce influence of soil-formation processes and subject to compacting from the weight of the materials that are continually added (Table 3 and Figure 2).

The ANOVA showed highly significant differences ($\alpha=0.05$) for the margins in the contents of clay, sand, VC and PWP (Table 3), suggesting that with the system management and the soil clearance, new materials are incorporated which modify the textural behavior because of the lateral growth of the terraces. The margins change their soil fraction composition and the finer fractions tend to accumulate in the central part; this agrees with what was reported by Sullivan (2000) for runoff agriculture systems in southwestern United States, where they report that there are changes in the textural patterns of the plots with runoff management. For silts and apparent density there are statistical differences by age, which are variables related to the contribution of materials without weathering that become incorporated into the system's margins, where coarse fractions predominate; finer fractions of the transported materials tend to accumulate in the central part. For silts and apparent density, there are statistical differences because of the position of the plot (age) (Table 4) which may be explained because it is the easiest fraction to transport by the superficial flow; the hydraulic conductivity reported significant

Cuadro 3. Variabilidad de las propiedades físicas del suelo en el sistema lama-bordo por posición.
Table 3. Variability of the physical properties of the soil in the lama-bordo system by position.

Propiedad	Posición			Promedio	p>F	DMSH
	Derecha	Centro	Izquierda			
Arcilla (%)	24.40 b*	38.54 a	34.40 a	32.645	0.001	8.2921
Limo (%)	20.40 a	17.82 a	16.80 a	18.323	0.361	6.2311
Arena (%)	55.20 a	43.64 b	48.80 ab	49.032	0.001	6.5694
Capacidad de campo (%)	27.10 b	34.82 a	32.90 a	31.710	0.001	4.6660
Punto de marchitez permanente (%)	15.80 b	23.18 a	21.20 a	20.161	0.002	4.6724
Da (Mg m ⁻³)	1.49 a	1.44 a	1.46 a	1.465	0.156	0.0558
Conductividad hidráulica (mm h ⁻¹)	15.65 a	3.54 b	4.24 b	7.675	0.015	10.7070

*Valores con la letra diferentes son estadísticamente diferentes ($\alpha=0.05$) ♦ *Values with different letters are statistically different ($\alpha=0.05$).

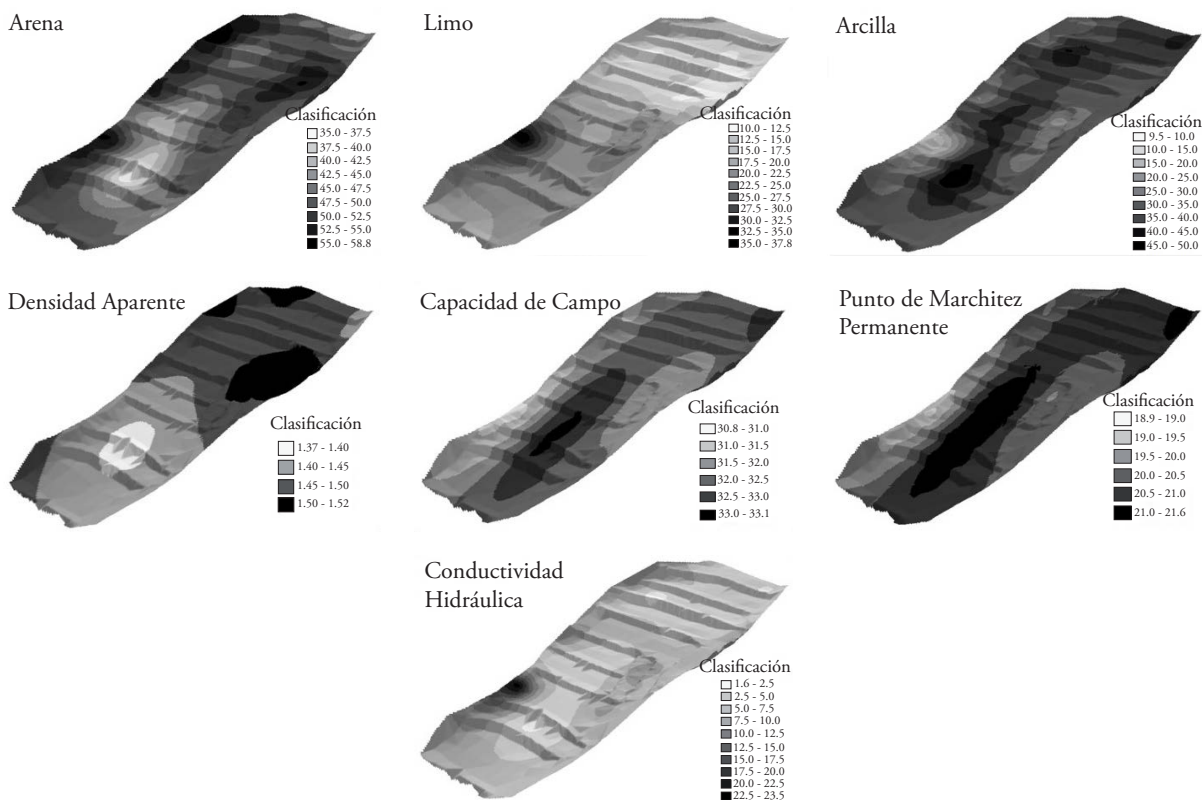


Figura 2. Variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo en el sitio de lama-bordo.
Figure 2. Spatial variability of the physical properties of the soil in the lama-bordo site.

aparente existen diferencias estadísticas por la antigüedad, que son variables relacionadas con el aporte de materiales sin intemperizar que se van incorporando en los márgenes del sistema, en los que predominan fracciones gruesas; en la parte central tienden a acumularse las fracciones más finas de los materiales acarreados. Para limos y densidad aparente existen diferencias estadísticas por la posición de la parcela (antigüedad) (Cuadro 4) que puede explicarse por ser la fracción más fácil de transportar por el flujo superficial; la conductividad hidráulica reportó diferencias significativas y un alto coeficiente de variación entre la margen derecha y las otras posiciones del muestreo. Lo anterior coincide con lo reportado por Kreznor *et al.* (1989) y Pachepsky *et al.* (2001), que señalan que las geoformas y la topografía son factores altamente correlacionados con la variabilidad espacial de las propiedades de los suelos.

Los valores más altos de la densidad aparente están relacionados con la incorporación de nuevos materiales al suelo de las terrazas; generalmente se trata de toba volcánica.

differences and a high coefficient of variation between the right margin and the other positions of the sample. This agrees with what was reported by Kreznor *et al.* (1989) and Pachepsky *et al.* (2001), who point out that the geographic formations and the topography are factors highly correlated with the spatial variability of the soil properties.

The highest values of apparent density are related to the incorporation of new materials to the terrace soil; generally it is tuff.

The means test showed significant differences ($\alpha=0.05$) for the clay, silt, sand contents, apparent density, field capacity, permanent wilting point, and hydraulic conductivity. In the percentage of clay there are significant differences due to position (Table 3); in the center and left margin of the plot there is higher concentration of fine particles than in the right margin, indicating the water flow lines within the plots and the incorporation of coarser materials from the hillsides to the right due to management. The percentage of silt has difference due to age (Table 4); in the plots of the lower part (9, 10 and

Cuadro 4. Variabilidad de las propiedades físicas del suelo en el sistema lama-bordo por antigüedad.
Table 4. Variability of the physical properties of the soil in the lama-bordo system by age.

Propiedad	Antigüedad			Promedio	p>F	DMSH
	Joven	Media	Vieja			
Arcilla (%)	35.167 a	33.600 a	28.222 a	32.65	0.2423	10.262
Limo (%)	14.000 b	18.200 b	24.220 a	18.32	<0.0001	4.3808
Arena (%)	50.833 a	48.200 a	47.556 a	49.03	0.5806	8.4242
Capacidad de campo (%)	32.667 a	32.000 a	30.110 a	31.71	0.5553	5.9018
Punto de marchitez permanente (%)	21.417 a	20.400 a	18.222 a	20.16	0.3883	5.7221
Da (Mg m ⁻³)	1.491 a	1.468 ba	1.426 b	1.46	0.0122	0.0512
Conductividad hidráulica (mm h ⁻¹)	3.857 b	5.581 ba	15.092 a	7.68	0.0473	11.218

La prueba de medias mostró diferencias significativas ($\alpha=0.05$) para los contenidos de arcilla, limo, arena, densidad aparente, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y conductividad hidráulica. En el porcentaje de arcilla hay diferencias significativas por la posición (Cuadro 3); en el centro y margen izquierdo de la parcela existe mayor concentración de partículas finas que en el margen derecho, lo que indica las líneas de flujo de agua dentro de las parcelas y la incorporación materiales más gruesos de las laderas de la derecha por efecto del manejo. El porcentaje de limo tiene diferencia por antigüedad (Cuadro 4); en las parcelas de la parte baja (9, 10 y 11) existe mayor porcentaje en comparación con las que se localizan en la alta (parcelas 1, 2, 3 y 4). El de arena mostró diferencia por margen de la parcela; el mayor porcentaje de arena se reportó en ambos márgenes (derecho e izquierdo) por la presencia de zonas degradadas y en proceso de recuperación con el laboreo y una menor proporción se presentó en la parte central de la parcela. La densidad aparente tuvo diferencia por efecto de la antigüedad; las parcelas de la parte alta presentan los valores más altos, asociados a la presencia de materiales arenosos; la CC y PMP tuvieron diferencias significativas en los márgenes de la parcela y no hubo diferencia entre el margen izquierdo y el centro. La conductividad hidráulica tuvo diferencias significativas entre márgenes, ya que el margen derecho es diferente al izquierdo y el centro.

Variabilidad de las propiedades químicas del sistema lama-bordo

El pH presentó un CV bajo (3.65 %) y el resto de las propiedades (MO; N, P, K y COS) tienen altos coeficientes de variación, lo que muestra la

11) there is higher percentage in comparison to those located in the high part (plots 1, 2, 3 and 4). The percentage of sand showed difference by margin of the plot; the highest percentage of sand was reported in both margins (right and left) because of the presence of degraded zones and in process of repair with tilling, and a lower proportion was present in the central part of the plot. The apparent density had a difference due to age; the plots from the high part present higher values, associated to the presence of sand materials; the FC and PWP had significant differences in the plot's margins and there was no difference between the center and left margin. The hydraulic conductivity had significant differences between margins, since the right margin is different from the left and center.

Variability of the chemical properties of the lama-bordo system

The pH presented a low VC (3.65 %) and the rest of the properties (OM; N, P, K and SOC) have high coefficients of variation, which shows the spatial variability of these properties in the lama-bordo system (Table 5 and Figure 3).

Figure 3 shows the geospatial variability of the chemical properties of the soil; it is observed that the organic matter contents are higher in the low part of the lama-bordo system, attributable to the age of the terrace construction and to the presence of the soil formation process of aggregation of particles and improvement of the structure, which shows the benignity of the system in the carbon capture that moves with superficial runoff.

The variance analysis (ANOVA) indicates that the spatial variability of chemical properties of the soil

Cuadro 5. Variabilidad de las propiedades químicas del suelo en el sistema lama-bordo por posición.
Table 5. Variability of the chemical properties of the soil in the lama-bordo system by position.

Propiedad	Posición			Promedio	p>F	DMSH
	Derecha	Centro	Izquierda			
pH	7.66 a	7.65 a	7.73 a	7.678	0.784	0.3075
Materia orgánica (%)	2.28 a	2.40 a	2.49 a	2.395	0.836	0.9349
Nitrógeno total (%)	0.073 a	0.094 a	0.102 a	0.090	0.328	0.0479
Fósforo (mg kg ⁻¹)	6.138 a	5.688 a	5.683 a	5.832	0.917	2.9278
Potasio (cmol (K)kg ⁻¹)	0.529 a	0.692 a	0.640 a	0.623	0.504	0.3480
CIC (cmol(+))kg ⁻¹)	19.680 a	22.807 a	22.784 a	21.791	0.457	6.7371
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	0.321 a	0.340 a	0.296 a	0.320	0.684	0.1146
COS (t ha ⁻¹)	39.26 b	147.34 a	39.97 b	77.839	0.001	72.222

variabilidad espacial de estas propiedades en el sistema lama-bordo (Cuadro 5 y Figura 3).

La Figura 3 muestra la variabilidad geoespacial de las propiedades químicas de suelo; se observa que los contenidos de materia orgánica son más altos en la parte baja del sistema lama-bordo, atribuible a la antigüedad en la construcción de las terrazas y la presencia de proceso pedogenéticos de agregación de partículas y mejora de la estructura, lo que muestra la bondad del sistema en la captura del carbono que se mueve con los escurrimientos superficiales.

El análisis de varianza (ANOVA) indica que la variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo se debe a la posición del muestreo, a la parcela o a la posición de la parcela en el sistema; se encontraron

is due to the position of the sampling, to the plot or the position of the plot in the system; significant differences were found in the contents of organic matter, potassium and organic carbon (Table 5).

The system retains in average 72 Mg ha⁻¹ of soil organic carbon (SOC), which tends to accumulate in a higher proportion in the central part of the terraces with average values of 132 Mg ha⁻¹ (Table 5). The contents of total nitrogen and phosphorus do not report significant differences despite showing high variation coefficients in their spatial distribution in the system.

The means comparison test shows significant differences in the contents of organic matter due to the position of the plot (age of the lama-bordo);

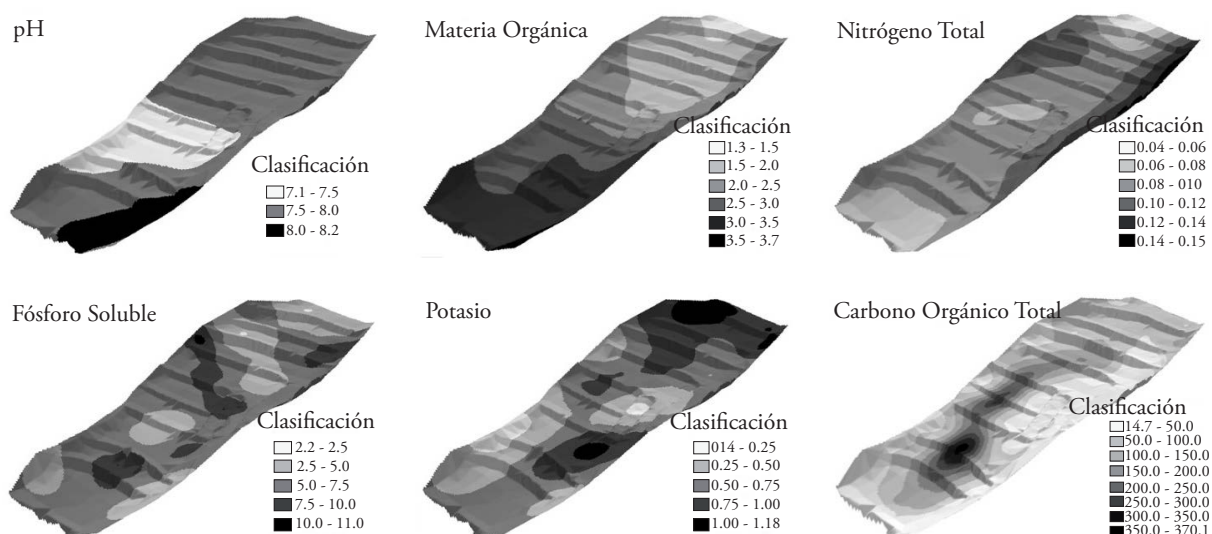


Figura 3. Variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo en el sitio de lama-bordo en Teotongo.
Figure 3. Spatial variability of the chemical properties of the soil in the lama-bordo site in Teotongo.

diferencias significativas en los contenidos de materia orgánica, potasio y carbono orgánico (Cuadro 5).

El sistema retiene en promedio 72 Mg ha⁻¹ de carbono orgánico en el suelo (COS), el cual tiende a acumularse en mayor proporción en la parte central de las terrazas con valores promedio de 132 Mg ha⁻¹ (Cuadro 5). Los contenidos de nitrógeno total y de fósforo no reportaron diferencias significativas a pesar de reportar altos coeficientes de variación en su distribución espacial en el sistema.

La prueba de comparación de medias muestra diferencias significativas en los contenidos de materia orgánica por la posición de la parcela (antigüedad del lama-bordo); las parcelas jóvenes (9, 10 y 11) reportan los contenidos más altos de materia orgánica (92 Mg ha⁻¹), que es 60 % más alto en comparación con los valores registrados en las parcelas viejas (1, 2 y 3) (Cuadro 6). Como se señaló previamente, las obras de conservación de suelos como el sistema lama-bordo captan los sedimentos transportados por los escurrimientos, propician la infiltración, almacenan más agua en las terrazas y retienen el material orgánico acarreado con el escurrimiento, mejorando la calidad los suelos en las zonas de sedimentación como lo reportan Mueller *et al.* (2012) y Leigh *et al.* (2013).

Los contenidos de potasio tuvieron diferencias significativas entre parcelas; la 1 está dentro de la clase alta, a diferencia de la 11, que está dentro de la clase baja, y el carbono orgánico total mostró diferencias significativas en cuanto al margen de la parcela; el centro es diferente del margen derecho e izquierdo.

El sistema lama-bordo capta humedad, retiene suelos, conforma áreas de cultivos, captura carbono y reduce los riesgos en la producción de cultivos por la presencia de sequías; sin embargo, existe un abandono

the young plots (9, 10 and 11) report the highest contents of organic matter (92 Mg ha⁻¹), which is 60 % higher in comparison to the values found in the old plots (1, 2 and 3) (Table 6). As was mentioned previously, soil conservation works such as the lama-bordo system capture the sediments transported by runoffs, foster infiltration, store more water in the terraces, and retain the organic matter transported by the runoff, improving the quality of soils in the sedimentation zones as reported by Mueller *et al.* (2012) and Leigh *et al.* (2013).

The potassium contents had significant differences between plots; number 1 is within the high class, compared to number 11, which is within the low class, and total organic carbon showed significant differences in terms of the margin of the plot; the center is different from the right and left margins.

The lama-bordo system captures moisture, retains soils, shapes cultivation areas, captures carbon and reduces risks in the production of crops from the presence of droughts; however, there is abandonment of this production system that translates into the destruction of the *bordos* and the dragging of material previously retained. The rescue of this Pre-Hispanic technology is a responsibility of the owners of plots with lama-bordo, and the government could support them as a strategy for soil conservation and for production of the grains that the rural population demands from this marginalized zone in the country.

CONCLUSIONS

The constant contribution of sediments and the management practices carried out by producers in the lama-bordo system provoke a high spatial variability

Cuadro 6. Variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo del sistema lama-bordo por antigüedad.
Table 6. Spatial variability of the chemical properties of the soil in the lama-bordo system by age.

Propiedad	Antigüedad			Promedio	p>F	DMSH
	Joven	Media	Vieja			
pH	7.784 a	7.523 a	7.710 a	7.68	0.1251	0.2897
M.O. (%)	1.972 b	2.336 ab	3.024 a	2.39	0.0112	0.8062
Nitrógeno total (%)	0.101 a	0.081 a	0.085 a	0.09	0.4898	0.0488
Fósforo (mg kg ⁻¹)	5.512 a	6.337 a	5.698 a	5.83	0.7717	2.9274
Potasio (cmol (K)kg ⁻¹)	0.848 a	0.500 b	0.458 b	0.62	0.0033	0.2924
CIC (cmol(+)kg ⁻¹)	21.333 a	23.112 a	20.933 a	21.79	0.6648	6.8692
Conductividad eléctrica (dSm ⁻¹)	0.276 a	0.320 a	0.378 a	0.32	0.1640	0.1098
COS (t ha ⁻¹)	57.850 a	88.234 a	92.941 a	77.84	0.5763	92.053

de este sistema de producción que se traduce en la destrucción de los bordos y del arrastre del material previamente retenido. El rescate de esta tecnología prehispánica es una responsabilidad de los dueños de las parcelas con lama-bordo y el gobierno los podría apoyar como una estrategia para conservar suelos y producir los granos que demanda la población rural de esta zona marginada del país.

CONCLUSIONES

El aporte constante de sedimentos y las prácticas de manejo realizadas por los productores en el sistema lama-bordo provocan una alta variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas de los suelos, mejorando los contenidos de materiales finos, materia orgánica, carbono y calidad del suelo para la producción de cultivos.

La acumulación de materia orgánica tiene una estrecha relación con la antigüedad de las parcelas ya que se encontró en mayor cantidad en la parte baja del sistema lama-bordo, es decir, en las parcelas más antiguas.

El carbono orgánico se concentró en la parte central del sistema lama-bordo; los bordos reducen la velocidad del flujo del agua y propician que los materiales en suspensión se depositen.

Los suelos de las márgenes izquierda y derecha del sistema lama-bordo tienen menor calidad que los de la parte central, lo que se explica por la incorporación de materiales con escasos procesos pedogenéticos provenientes de las zonas aledañas al sistema.

LITERATURA CITADA

- Arnhold S., D. Otieno, J. Onyango, T. Koellner, B. Huwe, and J. Tenhunen. 2015. Soil properties along a gradient from hillslopes to the savanna plains in the Lambwe Valley, Kenya. *Soil and Tillage Research* 154: 75-83.
- Blake, G. R. 1965. Bulk Density. *In*: A. Klute (ed). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. Madison, Wisconsin. pp: 374-390.
- Bouyoucos, G. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agronomy Journal*. 54: 464-465.
- Bremner, J. M. 1965. Nitrogen availability indexes. *In*: C. A. Black *et al.* (ed). *Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Madison, Wisconsin. pp: 1324-1345.
- Campbell, J. B. 1979. Spatial variability of soils. *Annals of the Association of American Geographers*. 69(4):544-556.
- Ceddia, M.B., S. R. Vieira, A.L.O. Villela, L. S. Mota, L.H.C. Anjos, and D. F. Carvalho. 2009. Topography and spatial variability of soil physical properties. *Scientia Agricola* 66(3):338-352.
- Chapman, H. D. 1965. Cation-Exchange Capacity. *In*: A. G. Nor-

man (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Madison, Wisconsin. pp: 891-901.

Dercon, G., J. Deckers, G. Govers, J. Poesen, H. Sánchez, R. Vanegas, M. Ramírez, y G. Loaiza. 2003. *Soil & Tillage Research*. 72: 31-41.

Galindo Escamilla, E. 2008. Captación de agua de lluvia y retención de suelos en jollas en el parte aguas de las cuencas de los ríos Actopan y Amajac. *Boletín del Archivo Histórico del Agua*. Año 13, Número especial. pp: 17-20.

González M., L., J. D. Etchevers B., y C. Hidalgo M. 2008. Carbono en suelos de ladera: Factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia*. 42 (7): 741-751.

Kilic, K., S. Kilic, and R. Kocyigit. 2012. Assessment of spatial variability of soil properties in areas under different land use. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 18(5): 722-732.

Klute, A. 1986. Water Retention: Laboratory Methods. *In*: A. Klute (ed). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. Madison, Wisconsin. pp: 635-662.

Klute, A. and C. Dirksen. 1965. Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory methods. *In*: A. Klute (ed). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. Madison, Wisconsin. pp: 687-734.

Kreznor, W. R. Kenneth, W. Banwart, and D. L. Johnson. 1989. Soil, Landscape, and Erosion Relationships in a Northwest Illinois Watershed. *Soil Science Society of America*. 53(6):1763-1771

Leigh, D., S. Kowalewski, and G. Holdridge. 2013. 3400 years of agricultural engineering in Mesoamerica: lama-bordo of the Mixteca Alta, Oaxaca, México. *Journal of Archaeological Science*. 40(11):4107-4111.

Martínez, J. (coord). 2006. Manejo del agua y restauración productiva en la región indígena mixteca de Puebla y Oaxaca. Resultados de los estudios y recomendaciones para los tomadores de decisiones de las comunidades y Organizaciones de la Sociedad Civil. México, D. F. 103 p.

— End of the English version —

- Moore, I. D., P. E. Gessler, G. A. Nielsen, and G. A. Peterson. 1993. Soil Attribute Prediction Using Terrain Analysis. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 57: 443-452
- Mueller, R., A. Joyce, and A. Borejsza. 2012. Alluvial archives of the Nochixtlan valley, Oaxaca, Mexico: Age and significance for reconstructions of environmental change. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (321-322):121-136.
- Mzuku, M., Khosla, Reich, D. R. Inman, F. Smith, y L. MacDonald. 2005. Spatial Variability of Measured Soil Properties across Site-Specific Management Zones. *Soil Science Society of America.* 69:1572-1579.
- Núñez, D., y G. Marten. 2013. Combatiendo la desertificación con reforestación comunitaria y agricultura sustentable. En línea: <http://www.ecoinflexiones.org/historias/detallados/mexico-oaxaca-reforestacion-comunitaria-mixteca.html>. Consultado el 14 de marzo de 2013.
- Olsen S. R., C. V. Cole, F. S. Watanabe, y L. A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Washington, D. C. Circular 939.
- Pachepsky, A., D. J. Timlin, and W. J. Rawls. 2001. Soil Water Retention as Related to Topographic Variables. *Soil Science Society of America* 65(6):1787-1795.
- Pérez R., V., and K. C. Anderson. 2006. Terracing in the Mixteca Alta, México: Cycles of resilience of an ancient land – use strategy. *Human Ecology* 41: 335-349.
- Pratt, P. F. 1965. Potassium. *In*: A. G. Norman (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties.* Madison, Wisconsin. pp: 1022-1030.
- Rivas Guevara, M. 2008. Caracterización del manejo del suelo y uso del agua de lluvia en la Mixteca Alta: *jollas* y maíces de cajete. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 245 p.
- Rivas Guevara, M., B. Rodríguez Haros, y J. Palerm Viqueira. 2008. El sistema de jollas, una técnica de riego no convencional en la Mixteca. *Boletín del Archivo Histórico del Agua.* Año 13, Número especial. pp: 6-16.
- Rivas Guevara, M., J. Palerm V., A. Muñoz O., J. Cuevas S., y T. Martínez S. 2006. Las Jollas en la mixteca oaxaqueña. Una técnica tradicional de captación de agua de lluvia para riego. 52° Congreso Internacional de Americanistas. *In*: Palerm J. y R. García B. *El acceso al agua en la historia de América.* Sevilla, España. pp: 1-22.
- Rosemary F., Vitharana U. W. A., Indraratne S.P., Weerasooriya R. and Mishra U. 2016. Exploring the spatial variability of soil properties in an Alfisol soil catena. *Catena.* 150: 53-61.
- Saldaña, A., A. Stein, y J. A. Zinck. 1998. Spatial variability of soil properties at different scales within three terraces of the Henares River (Spain). *Catena.* 33: 139-153.
- SEMANART - Colegio de Postgraduados. 2003. Evaluación de la degradación del suelo inducida por el hombre, escala 1: 250,000. México.
- SEMANART-UACH. 2003. Evaluación de la erosión hídrica y eólica en la República Mexicana. México.
- Spores, R., N. M. Robles, L. D. Luna, J.L. Tenorio, L. Roldán, y N. Matsubara. 2008. Investigaciones arqueológicas en Yucunda, el pueblo viejo de Teposcolula, Oaxaca. *Arqueología.* 37(1):155-173.
- Sullivan III, A. P. 2000. Effects of Small-Scale Prehistoric Runoff Agriculture on Soil Fertility: The Developing Picture from Upland Terraces in the American Southwest. *Geoarchaeology: An International Journal,* 15(4):291-313.
- Walkley, A., and I. A. Black, 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37:29-38.
- Wang, Y. Q., and M. A. Shao, 2013. Spatial variability of soil physical properties in a region of the loess plateau of Pr China Subject to wind and water erosion. *Land Degradation & Development.* 24:296-304.
- Willard H. H., L. L. Merrit, and J. A. Dean 1974. Instrumental methods of analysis. 5a edición. Van Nostrand.