

TASA DE DESCOMPOSICIÓN DE RAÍCES DE MAÍZ EN PARCELAS Y REGIONES USANDO CONOCIMIENTO LOCAL DE TIERRAS Y ANÁLISIS TÉCNICO DE SUELOS

RATE OF ROOT DECOMPOSITION OF MAIZE AT PLOTS AND REGIONS USING LOCAL LAND KNOWLEDGE AND TECHNICAL ANALYSIS OF SOILS

Carlos A. **Torres-Guerrero**¹, M. Carmen **Gutiérrez-Castorena**^{1*}, Carlos A. **Ortiz-Solorio**¹, Juan M. **Herrera**², Edgar V. **Gutiérrez-Castorena**³, Jorge D. **Etchevers-B.**¹

¹Edafología. Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados, 56230. Montecillo, Estado de México, México. (castor@colpos.mx) ²Agroscope. Route de Duillier 50, 1260 Nyon, Switzerland. ³Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía.

RESUMEN

La mayoría de estudios en México sobre la descomposición de raíces de cultivos se realiza en superficies pequeñas y condiciones controladas; esto limita la información regional. En contraste, el conocimiento tradicional campesino de suelos proporciona información que permite conocer la distribución y el manejo agronómico de los suelos en áreas mayores. El objetivo fue determinar la tasa de descomposición de las raíces < 2 mm de maíz en tierras con clase y manejo agronómico diferentes al combinar conocimiento técnico y campesino de suelos. El estudio se realizó en el ejido Vega de Madero, Hidalgo. Con recorridos de campo se determinaron las clases de tierra y con entrevistas a productores locales se seleccionaron las parcelas para el estudio. La tasa de descomposición de raíces, las propiedades edáficas y la clasificación de los suelos se obtuvieron de núcleos de crecimiento interno instalados en las parcelas y muestras alteradas de suelo recolectadas. Seis tratamientos (parcelas) se seleccionaron: tres clases de tierra (barro negro, BN, barro pardo, BP, y barro con tepetate blanco, BB) y dos manejos agronómicos (monocultivo y rotación de cultivos). El diseño experimental fue completamente al azar y los datos se analizaron con ANDEVA y prueba de Tukey para comparar medias. En el área de estudio ocurren Vertisols e Inceptisols (Soil Taxonomy) o Vertisols y Regosols (WRB). Los productores reconocen tres velocidades de descomposición en función de la presencia o ausencia de raíces delgadas y gruesas, las que coincidieron con los valores calculados en los núcleos de crecimiento interno en campo. La mayor tasa de mortalidad en orden decreciente se presentó en BN (0.047), BB (0.024) y BP (0.011) con riego y en BP (0.001) en seco. La interacción

ABSTRACT

Most studies in Mexico on the decomposition of crop roots are carried out on small surfaces and under controlled conditions; this fact limits the regional information. In contrast, local soil knowledge provides information that allows to know the distribution and agronomic management of soil in larger areas. The objective was to determine the rate of decomposition of maize roots < 2 mm in lands with different type and agricultural management by combining technical and local soil knowledges. The study was conducted in the Vega de Madero ejido, Hidalgo. Land classes were determined through field trips with farmers work, and the plots were selected through interviews with local producers. The rate of decomposition was obtained from in-growth cores installed in the plots. In addition, bulk soil samples were taken to determine their edaphic properties and their soil classification. Six treatments (plots) were selected in three land classes (clayey black, BN, clayey brown, BP, and clayey with white Tepetate, BB) and two agronomic managements (monoculture and crop rotation). Experimental design was completely randomized, and data were analyzed with ANOVA and Tukey test to compare means. Vertisols and Inceptisols (Soil Taxonomy) or Vertisols and Regosols (WRB) occur in the study area. The local producers recognize three speeds of decomposition based on the presence or absence of fine and thick roots, which matched the values calculated in the in-growth cores in the field. The highest mortality rate in decreasing order was in BN (0.047), BB (0.024) and BP (0.011) with irrigation and in BP (0.001) in rainfed conditions. The interaction between local and technical soil knowledge allowed identifying and calculate speeds and rates of decomposition of roots with different crop management.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: marzo, 2018. Aprobado: julio, 2018.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 53: 661-680. 2019.

Key words: *Zea mays*, ethnopedological study local knowledge, radical density, management, relative rate of decomposition, carbon input.

entre el conocimiento local y técnico de suelo permitió identificar y calcular velocidades y tasas de descomposición de raíces con manejo agronómico distinto.

Palabras clave: *Zea mays*, conocimiento edafológico local, densidad radical, manejo agronómico, tasa de descomposición relativa, fijación de carbono.

INTRODUCCIÓN

La descomposición de las raíces, su interacción con el suelo, la regulación de la transferencia de C y el efecto en el ciclo de nutrientes en los ecosistemas (Bloomfield *et al.*, 1996) son procesos fundamentales para el desarrollo de las plantas. Además, la descomposición de las raíces representa un flujo abundante de CO₂ hacia la atmósfera (Canadell *et al.*, 2007); este proceso de descomposición depende de la composición y el grosor de las raíces (contenido de lignina), de la temperatura media anual y el contenido de humedad del suelo de la zona de crecimiento de la planta (Gill y Jackson, 2000; Silver y Miya, 2001; Zhang y Wang, 2015). Otros factores, como manejo agronómico (van Noordwijk *et al.*, 1994; Linh, *et al.*, 2015) y riego (Arroita *et al.*, 2013) también afectan. En monocultivos el crecimiento de los sistemas radicales disminuye por la compactación; en contraste, con la rotación de cultivos las raíces modifican su estructura y desarrollo (Albino-Garduño *et al.*, 2015; Linh *et al.*, 2015; Mu *et al.*, 2016). El riego modifica la distribución espacial y temporal, la densidad y capacidad de penetración de las raíces (Wang *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2016) y la disponibilidad de los nutrientes del suelo (Seiffert *et al.*, 1995). El grosor de las raíces (finas <2 mm y gruesas >2 mm) afecta los procesos de descomposición (Zhang y Wang, 2015). Las raíces finas, por su abundancia, representan costo metabólico de C mayor para la planta respecto a las gruesas (Yuan y Chen 2010) y pueden fungir como sumidero de C en agrosistemas (Zhang y Wang, 2015). A pesar del conocimiento sobre este proceso, las investigaciones se han desarrollado en lotes o parcelas experimentales (Silver y Miya, 2001; Zhang y Wang, 2015) y los resultados se extrapolan incluso en escalas pequeñas (Gill y Jackson, 2000); por lo cual, no existe información regional del proceso de descomposición de raíces.

La descomposición de las raíces se cuantifica generalmente con técnicas destructivas (Silver y Miya,

INTRODUCTION

Roots decomposition, their interaction with the soil, transfer regulation of C and their effect on the nutrient cycle in ecosystems (Bloomfield *et al.*, 1996) are fundamental processes for plant development. Furthermore, roots decomposition represents an abundant flow of CO₂ into the atmosphere (Canadell *et al.*, 2007); this decomposition process depends on the composition and thickness of the roots (lignin content), annual mean temperature and soil humidity content in the plant growth zone (Gill and Jackson, 2000; Silver and Miya, 2001; Zhang and Wang, 2015). Other factors, such as agronomic management (van Noordwijk *et al.*, 1994, Linh, *et al.*, 2015) and irrigation (Arroita *et al.*, 2013) also affect. In monocultures the growth of radical systems decreases due to the compaction; in contrast, with crop rotation the roots modify soil structure and development (Albino-Garduño *et al.*, 2015, Linh *et al.*, 2015, Mu *et al.*, 2016). Irrigation modifies roots spatial and temporal distribution, also the density and penetration capacity of the roots (Wang *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2016) and the availability of soil nutrients (Seiffert *et al.*, 1995). The thickness of the roots (fine <2 mm and thick > 2 mm) affects the decomposition processes (Zhang and Wang, 2015). The fine roots, due to their abundance, represent a higher metabolic cost of C for the plant compared to the thick ones (Yuan and Chen 2010) and can serve as a sink for C in agrosystems (Zhang and Wang, 2015). Despite the knowledge about this process, research has been developed in experimental plots or lots (Silver and Miya, 2001; Zhang and Wang, 2015) and those results are extrapolated even in small scales (Gill and Jackson, 2000); therefore, there is no regional information on the root decomposition process.

Roots decomposition is generally quantified with destructive techniques (Silver and Miya, 2001) thus limiting the interpretation of transformation processes and development of soil structure (aggregation and porosity). The use of in-growth cores solves this problem since they allow monitoring the production and decomposition of the roots during the growth of a crop, without altering its production *in situ* (Steingrobe *et al.*, 2001).

Spatial information of roots decomposition in a region by means of soil removal is slow and costly;

2001) que limitan la interpretación de los procesos de transformación y desarrollo de la estructura del suelo (agregación y porosidad). El uso de núcleos de crecimiento interno resuelve esta problemática ya que permite monitorear la producción y descomposición de las raíces durante el crecimiento de un cultivo, sin alterar su producción *in situ* (Steingrobe *et al.*, 2001). La información espacial de la descomposición de las raíces en una región mediante levantamiento de suelos es lenta y costosa; por lo que, su factibilidad se restringe (Ortiz-Solorio, 2010). En este sentido, la clasificación campesina de tierras ha sido útil para relacionar las prácticas agronómicas (Ortiz-Solorio y Gutiérrez-Castorena, 2001), la fertilidad del suelo (Alfaro *et al.*, 2000), el potencial productivo de cultivos (Sánchez *et al.*, 2002), la incorporación de enmiendas orgánicas y la rotación de cultivos (Reséndiz-Paz *et al.*, 2013). La cartografía de clases de tierras ha permitido regionalizar producción y técnicas de laboreo en zonas de cultivo (Sánchez-Guzmán *et al.*, 2002; Licona *et al.*, 2006). Por lo anterior, la ubicación, representación y cuantificación de la tasa de producción y descomposición regional de raíces podría permitir a cualquiera utilizar en forma combinada el conocimiento local de tierras y el análisis técnico de suelos. Los objetivos de esta investigación fueron establecer la tasa de descomposición de las raíces en parcela y regional con diferentes manejos agronómicos, mediante integración del conocimiento local de tierras y técnico de suelos, y generar el mapa temático regional de este proceso.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El ejido Vega de Madero (556 ha) pertenece al municipio de Tepeji del Rio, estado de Hidalgo, México (19° 58'-19° 59' N y 99° 25'- 99° 27' O; Figura 1); es parte de la región fisiográfica denominada Eje Volcánico Transmexicano, donde los materiales parentales dominantes son rocas extrusivas y piroclásticas (Krasilnikov *et al.*, 2013). El clima de la zona es templado semi-húmedo con lluvias en verano, con humedad residual del suelo de ocho meses, precipitación total anual promedio de 892 mm y temperatura media anual de 12 °C. Los suelos predominantes distribuidos de oeste a este son Phaeozems y Vertisols (INEGI, 2015). La vegetación de la zona es inducida y se compone de cultivos como maíz (*Zea mays* L.), avena (*Avena sativa* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) (INEGI, 2015). El sistema de riego para

therefore, its feasibility is restricted (Ortiz-Solorio, 2010). In this sense, the local soil information knowledge has been useful to relate agronomic practices (Ortiz-Solorio and Gutiérrez-Castorena, 2001), soil fertility (Alfaro *et al.*, 2000), productive potential of crops (Sánchez *et al.*, 2002), incorporation of organic amendments and crop rotation (Reséndiz-Paz *et al.*, 2013). Additionally, land classes mapping has made possible the regionalization of production and tillage techniques in cultivated areas (Sánchez-Guzmán *et al.*, 2002, Licona *et al.*, 2006). Due to all above, to locate, represent and quantify the regional rate of roots production and decomposition might allow anyone the combined use of local and technical soil knowledge. The objectives of this research were to determine roots decomposition rate at plot and regional levels with different agronomic managements, through the integration of local and technical soil knowledge and to generate the regional thematic map of this process.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The Vega de Madero ejido (556 ha) belongs to the municipality of Tepeji del Rio, state of Hidalgo, Mexico (19° 58'-19° 59' N and 99° 25'- 99° 27' O; Figure 1); this *ejido* is part of the physiographic region named Transmexican Volcanic Belt, where the dominant parent materials are extrusive and pyroclastic rocks (Krasilnikov *et al.*, 2013). The zone has semi-humid temperate climate with rains in summer, eight-month residual humidity of the ground, a total mean annual precipitation of 892 mm and annual mean temperature of 12 °C. Predominant soils distributed from West to East are Phaeozems and Vertisols (INEGI, 2015). The vegetation in the area is induced and it consists of crops such as maize (*Zea mays* L.), oat (*Avena sativa* L.) and beans (*Phaseolus vulgaris* L.) (INEGI, 2015). Irrigation system for the crops is flooding (furrows and ridges) and water is supplied by a diversion dam west of the ejido.

Farmer land classification and field work

Land classes mapping was obtained through field work in the company of the producers and a base map of the ejido (Ortiz-Solorio *et al.*, 1990). The producers delimited land classes; then the boundaries were rectified with the support of the *Ejido* commissioner (who knows the boundaries accurately). Open, spontaneous and unpaid interviews were also carried



Figura 1. Localización del Ejido Vega de Madero en el territorio nacional.

Figure 1. Location of the Vega de Madero ejido in the national territory.

los cultivos es por inundación (surcos y melgas) y lo abastece una presa derivadora al oeste del ejido.

Clasificación campesina de tierras y trabajo de campo

La cartografía de clases de tierras se obtuvo con recorridos en compañía de los productores y mapa del ejido (Ortiz-Solorio *et al.*, 1990). Los productores delimitaron las tierras y rectificaron los linderos con apoyo del comisariado ejidal (quien conoce con precisión los linderos). También se realizaron entrevistas libres, espontáneas y no remuneradas a los productores, preferentemente en labor en sus parcelas, hasta que la información fuera repetitiva según la metodología propuesta por Williams y Ortiz-Solorio (1981). Las preguntas fueron: 1) ¿Cuántas clases de tierras ocurren en el ejido?; 2) ¿Cómo las reconocen?; 3) ¿Cuáles son las parcelas representativas en cada clase de tierra y su manejo agronómico (riego, cultivo, y fertilización)?; 4) ¿En cuál de ellas se descomponen más rápido las raíces?; y 5) ¿Por qué se descomponen más rápido las raíces?

En cada clase de tierra se excavaron pozos pedológicos con descripción de los sitios y el perfil de suelo, según el manual de Cuanalo (1990). De cada horizonte se colectaron 2 kg de suelo para analizar en laboratorio.

Para la información de clases de tierras y manejo agronómico se seleccionaron las parcelas con manejo diferente que tuvieran riego (r) o de secano (t). Las parcelas (t) se ubican en el noreste del ejido y en monocultivo sólo mostraron maíz. Las parcelas (r) fueron la mayoría en el ejido e incluyeron maíz en monocultivo (m) y maíz-avena en rotación (r). En esta selección se evaluó la producción y descomposición de raíces. En ambos casos las parcelas evaluadas tuvieron un mínimo de cinco años con el mismo manejo.

Los seis tratamientos (uno por parcela) evaluados consistieron en la combinación de tres clases de tierra y dos manejos agronómicos

out with the producers, preferably working their plots in each land class, until the information was repetitive according to the methodology proposed by Williams and Ortiz-Solorio (1981). The questions were: 1) How many types of land classes occur in the ejido?; 2) How do you recognize them?; 3) What are the representative plots in each type of land and their agronomic management (irrigation, cultivation, and fertilization)?; 4) In which one of them do the roots decompose faster?; and 5) Why do the roots decompose faster?

Soil pits were excavated in each type of land with descriptions of the sites and soil profile, according to Cuanalo's manual (1990); 2 kg of bulk soil samples were taken from each horizon to be analyzed in the laboratory.

For the information of land classes and agronomic management, plots with different management were selected: those that had irrigation (r) or rainfed (t) agriculture. The (t) plots are located in the northeast of the ejido and only showed maize in monoculture. The (r) plots were the majority in the ejido and included maize in monoculture (m) and maize-oat rotation (r). In this selection, roots production and decomposition were determined. In both cases, the evaluated plots were under the same management for a minimum of five years.

The six treatments (one per plot) consisted of the combination of three land classes and two agronomic managements (Table 1). In the case of BP+rainfed+monoculture, radical variables were not compared with the other treatments. The experimental design to quantify roots decomposition was completely random.

Six in-growth cores in different plants were installed randomly in the plots, according to the proposal of Steingrobe *et al.* (2001). The cores were monitored in the 2015 and 2016 crop cycles. This method allowed nondestructive, selective (by thickness) and periodic analysis of the radical variables.

Cores were replaced monthly with soil without roots and maintained in ice during field sampling. In the laboratory they

(Cuadro 1). En el caso de BP+temporal+monocultivo los variables radicales no se compararon con los demás tratamientos. El diseño experimental para cuantificar la descomposición de las raíces fue completamente aleatorio.

Seis núcleos de crecimiento interno en plantas diferentes se instalaron aleatoriamente en las parcelas, según la propuesta de Steingrobe *et al.* (2001). Los núcleos se monitorearon en los ciclos de cultivo 2015 y 2016. Este método permitió el análisis *in situ* no destructivo, selectivo (por grosor) y periódico de los variables radicales.

Los núcleos se reemplazaron mensualmente con suelo sin raíces y mantuvieron con hielo durante el muestreo en campo. En el laboratorio se mantuvieron a 4° C hasta su análisis. En ambos casos el monitoreo correspondió sólo a las plantas de maíz, inició 55 días después de la siembra (dds) y terminó 145 dds. La siembra del primer ciclo de cultivo de maíz fue el 9 de mayo de 2015 y los núcleos fueron consecutivos hasta el 3 de noviembre. En 2016 la siembra se hizo el 1 de junio, porque antes hubo un periodo de sequía en la región (SMN, 2017). Los núcleos se muestrearon el 28 de noviembre.

Algunos factores desfavorables durante el estudio fueron: en 2015 los productores del ejido retiraron los núcleos, por lo que se obtuvieron datos sólo en dos tratamientos a los 55 dds y en 2016 se instalaron sólo cuatro de seis tratamientos, porque las parcelas de una clase completa de tierra las cultivaron con hortalizas. En modo simultáneo con el reemplazo mensual, a 20 cm de profundidad y a un costado de los núcleos de crecimiento interno, se muestreó el suelo en cada parcela experimental, con barrena en espiral, tipo sacacorchos, para su análisis en el laboratorio.

were kept at 4 °C until their analysis. In both cases, monitoring corresponded only to maize plants, and it started 55 days after sowing (das) and finished 145 das. The sowing of first cycle of maize took place on May 9, 2015 and the cores were consecutive until November 3. In 2016 the sowing took place on June 1, because there was before a period of drought in the region (SMN, 2017). Cores were sampled on November 28.

Some unpromising factors during the study were: in 2015, the ejido producers removed the cores, so data was obtained only from two treatments at 55 das, and in 2016 only four out of six treatments were installed, because the plots with complete land classes were cultivated with vegetables. In parallel with the monthly replacement, the soil was sampled in each experimental plot and on one side of the in-growth core at 20 cm depth with an auger, corkscrew type, for analysis in the laboratory.

Laboratory analysis

Characteristics of soil and taxonomic classification

Bulk soil samples, dried in the shade, were sieved (2 mm particle) in order to obtain the fine dirt fraction. The procedures carried out include (Van Reeuwijk Manual, 1993): bulk density (paraffin method), color (Munsell color chart), texture (pipette method), field humidity (gravimetric method), organic matter (Walkley & Black), pH 2: 1 water: soil ratio (potentiometry), electrical conductivity (conductivity meter), cation exchange capacity, (ammonium acetate percolation pH = 7.0), soluble cations (percolation), interchangeable cations (percolation),

Cuadro 1. Tratamientos (parcelas) empleados en el experimento para calcular la descomposición de las raíces finas de maíz en el ejido Vega de Madero, Hidalgo.

Table 1. Treatments (plots) used in the experiment to calculate the decomposition of fine roots of maize in the Vega de Madero ejido, Hidalgo.

Tratamiento	Clase de Tierra	Irrigación	Tipo de cultivo
BP+i+m	Barro pardo	Irrigación	Monocultivo
BP+i+r			Rotación
BB+i+m	Barro con tepetate blanco		Monocultivo
BB+i+r			Rotación
BN+i+m	Barro negro		Monocultivo
BN+i+r			Rotación
[†] BP+t+m	Barro pardo	Temporal	Monocultivo

[†]La parcela BP+t+m no fue comparada con los demás por no tener características similares a los demás, sin embargo, fueron calculado los parámetros radicales ♦ The BP+t+m plot was not compared to the others because it did not have similar characteristics to the rest: however, the radical variables were calculated in that plot as well.

Análisis de laboratorio

Características de los suelos y clasificación taxonómica

Las muestras de suelo, secadas a la sombra, se tamizaron (partícula de 2 mm; fracción de tierra fina) y su análisis incluyó (Manual de Van Reeuwijk, 1993): densidad aparente (método de la parafina), color (carta de colores Munsell), textura (método de la pipeta), humedad de campo (método gravimétrico), materia orgánica (Walkley & Black), pH relación 2:1 agua:suelo (potenciometría), conductividad eléctrica (conductímetro), capacidad de intercambio catiónico, (percolación acetato de amonio pH=7.0), cationes solubles (percolación), cationes intercambiables (percolación), fósforo (soluble en ácido cítrico) y humedad gravimétrica (barrena en espiral). La clasificación de los suelos correspondió a la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 2014) y a la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS Working Group WRB, 2015). Los datos del contenido hídrico de cada parcela se relacionaron con las tasas de descomposición de las raíces.

Producción y descomposición de raíces en las diferentes clases de tierras

La longitud y la densidad radical (DR) de las raíces que atravesaron un tamiz de 2 mm se calcularon con el método del intercepto de Newman (1966); a su biomasa seca se obtuvo después de secarlas a 60 °C. Con la biomasa seca se calcularon las variables de productividad relativa, mortalidad relativa e índice de recambio por núcleo, según las ecuaciones propuestas por Steingrobe *et al.* (2001).

Una submuestra de biomasa radical seca (0.5 g) se trituró en mortero de ágata, hasta obtener partículas que pasaran por la malla 100. En ella se determinó el contenido de C orgánico por combustión seca en un analizador automático Shimadzu TOC 5000-A. Con el porcentaje de C orgánico y la biomasa seca de las raíces se calculó el aporte de C al suelo, con el supuesto de que 40% de la biomasa radical es carbono orgánico (Whipps, 1990).

Análisis de datos

Los variables radicales (DR, productividad, mortalidad e índice de recambio), el porcentaje de humedad y aporte de C al suelo mensuales de los tratamientos se analizaron con ANDEVA, de una vía con el paquete estadístico SAS® 9.1. Cuando existió significancia se practicó la prueba de Tukey para identificar los tratamientos disímiles. Los promedios totales de todos los variables se calcularon por tratamiento y se aplicó ANDEVA, el que mostró tendencia similar a los datos mensuales (no presentados).

phosphorus (soluble in citric acid) and gravimetric humidity (auger). Soil classification corresponded to the soil taxonomy (Soil Survey Staff, 2014) and the World Reference Base for Soil Resource (IUSS Working Group WRB, 2015). Water content data from each plot were related to the decomposition rates of the roots.

Production and decomposition of roots in different land classes

Length and radical density (DR) of the roots that passed through a 2 mm sieve were determined with the Newman intercept method (1966); biomass was obtained after drying at 60 °C. With the biomass, the variables of relative productivity, relative mortality and turnover index per core were estimated, according to the equations proposed by Steingrobe *et al.* (2001). A subsample of dry root biomass (0.5 g) was crushed in agate mortar, until obtaining particles that passed through the 100 mesh. Organic C content was determined in this subsample by dried combustion in a Shimadzu TOC 5000-A automatic analyzer. With the percentage of organic C and the biomass of the roots, the contribution of C to the soil was estimated, with the assumption that 40% of the root biomass is organic carbon (Whipps, 1990).

Data analysis

Radical variables (DR, productivity, mortality and turnover index), monthly percentage of humidity and contribution of C to the soil of the treatments were analyzed with one-way ANOVA with the statistical package SAS® 9.1. When there was significance, the Tukey test was used to identify the dissimilar treatments. Total averages of all variables were calculated by treatment and ANOVA was applied, which showed a similar trend to the monthly data (not shown). Through linear regressions, relations between radical variables and humidity content of the soil were identified.

RESULTS AND DISCUSSION

Local land classification

The inhabitants of the study area recognized three land classes, by surface from highest to lowest: black clayey (BN), brown clayey (BP) and clayey with white Tepetate (BB) (Figure 2).

The producers classify the lands based on their color, depth, humidity storage and time invested in tillage (Table 2). The quality of the land classes

Mediante regresiones lineales se identificaron relaciones entre los variables radicales y el contenido de humedad del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Clasificación campesina de tierras

Los pobladores en el área de estudio reconocieron tres clases de tierra, por superficie, de mayor a menor: barro negro (BN), barro pardo (BP) y barro con tepetate blanco (BB) (Figura 2).

Los productores clasifican las tierras con base en su color, profundidad, almacenamiento de humedad y tiempo invertido en labor (Cuadro 2). La calidad de las clases de tierras la definen con base en productividad, color, cantidad de barro, profundidad, grietas y presencia de capas endurecidas. Las tierras más fértiles son oscuras, pegajosas, poco agrietadas y profundas (BN). Las de menor calidad son claras, poco pegajosas, someras, con grietas, poco húmedas y con horizonte endurecido (BP y BB).

La preparación para la siembra en las parcelas en las tres clases de tierras es la similar en todos los casos (barbecho, rastreo y nivelación), pero varía en el número de veces que pasa la maquinaria por las parcelas.

is defined based on productivity, color, amount of clay, depth, cracks and the presence of hardened layers. The most fertile lands are dark, sticky, little cracked and deep (BN). The lands with lower quality are clear, not very sticky, shallow, with cracks, little humid and with a hardened horizon (BP and BB).

The preparation for sowing in the plots in the three types of land is similar in all cases (fallowing, tracking and leveling), but the number of times the machinery passes through the plots may vary. Land preparation work in BN and BB is lower than in BP, where the machinery usually passes through twice.

The fertilization is made with ammonium sulfate and the amounts that are added differed by type of land; BN needs less fertilizer. Plots were irrigated, except in BP which includes rainfed plots. Organic amendments are applied periodically in BN and BB, once a year and occasionally; in BP the interval is three to five years. Crops are mainly maize in monoculture and annual cycle or maize-oat rotation with alternating cycle; maize in spring and oat in winter annually (Table 3).

Texture of the lands is fine with high clay contents (50, 70 and 30% in BN, BP and BB) and the producers recognize BB as the “most sandy” land.

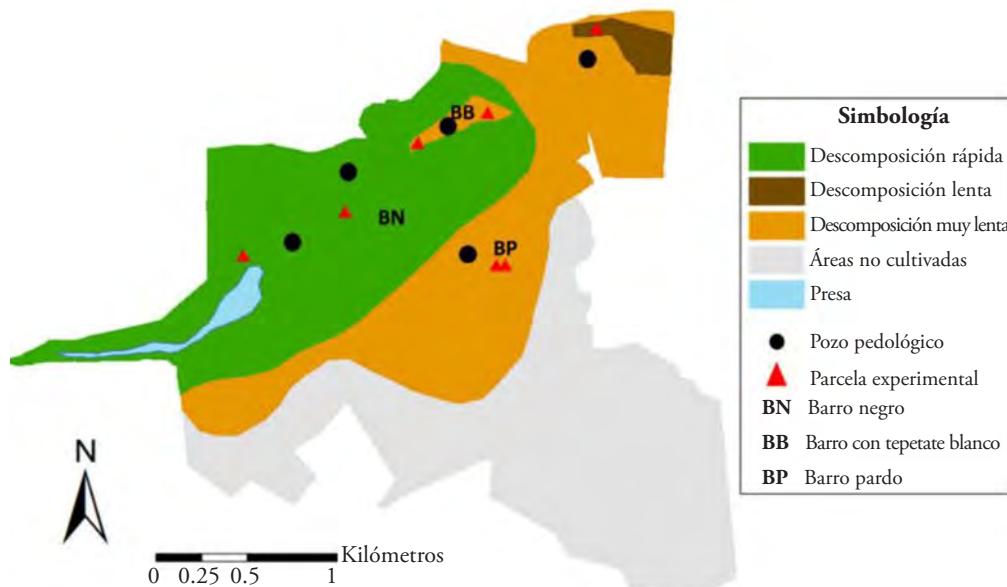


Figura 2. Mapa de la velocidad de descomposición de raíces y las diferentes clases de tierra según los productores y ubicación de los pozos edafológicos y parcelas experimentales en el ejido Vega de Madero, Hidalgo, México.

Figura 2. Map for roots decomposition and the different land classes according to producers and location of the pedological pits and experimental plots in the Vega de Madero ejido, Hidalgo, Mexico.

Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con las características descritas por los productores en las diferentes clases de tierras del ejido Vega de Madero, Hidalgo.

Table 2. Physical and chemical soil properties and its relation to the characteristics described by producers in the different land classes of the Vega de Madero ejido, Hidalgo.

Propiedad	Clase de tierra		
	Barro Pardo	Barro con Tepetate Blanco	Barro Negro
Consistencia en seco	Terrones duros	Terrones duros	Terrones muy duros
Consistencia en húmedo	Chiclosa	Arenosa	Muy chiclosa
Grietas en seco	< 5 cm	< 2 cm	> 5 cm
Retención de humedad	Guarda humedad	Guarda poca humedad	Guarda mucha humedad
Laboreo	Apretado si no hay agua	Más fácil de trabajar con maquinaria, aunque no haya humedad	Muy apretado si no hay agua
Fertilidad	Necesita mucho fertilizante	Necesita mucho fertilizante	Necesita poco fertilizante
Calidad			
Color	Pardo o café	Pardo claro	Negro
Barro	Mucho	Poco	Mucho
Profundidad (cm)	30-40	25-30	25-50
Capas endurecidas	Tepetate	Tepetate	Sin tepetate Presencia de rocas (> 30 cm)
Productividad	Poco productiva	Medianamente productiva	Muy productiva

El trabajo de preparación de terreno ena BN y BB es menor que en BP, donde la maquinaria suele pasar dos veces.

La fertilización se hace con sulfato de amonio y las cantidades que se adicionan difieren por clase de tierra; BN necesita menos fertilizante. Las parcelas se irrigan, excepto en BP que incluye parcelas de secano. Las enmiendas orgánicas se aplican periódicamente en BN y BB, una vez por año y esporádicamente; en BP en intervalo es de tres a cinco años. Los cultivos principalmente son maíz en monocultivo y ciclo anual o rotación maíz-avena con ciclo alternado maíz en primavera y avena en invierno anualmente (Cuadro 3).

Las texturas de las tierras son finas con contenidos altos de arcilla (50, 70 y 30% en BN, BP y BB) y los productores reconocen a BB como la tierra “más arenosa”. Las densidades aparentes (D_a) en la superficie son $> 1.5 \text{ g cm}^{-3}$ en las tierras finas (BN y BP); aunque pueden ocurrir valores de 1.34 g cm^{-3} cuando se incrementa el contenido de arena (BB). Los colores reconocidos por los productores para las clases de tierra corresponden con la carta de colores Munsell; es el caso de los pardos y pardos oscuros con las tierras BN, los pardos grisáceos con BP y los grises con las BB (Cuadro 4).

The bulk densities (D_a) on the surface are $> 1.5 \text{ g cm}^{-3}$ in the thin lands (BN and BP); although values of 1.34 g cm^{-3} may occur when the sand content (BB) increases. Colours recognized by the producers for the types of land correspond to the Munsell color chart; in this case, browns and dark browns with BN lands, gray browns with BP and grays with BB (Table 4).

Edaphic properties and Soil classification

In the BP and BB classes soil structure had a high development of subangular blocks of large size (up to 10 cm in length) and presence of cracks (2 to 5 cm thick). In the case of BN, the structural development and thickness of the cracks decreased with the increase of humidity in the soil (due to its proximity to the dam). Subangular blocks were 0.5 to 2.5 cm and cracks $< 2 \text{ cm}$ in the farthest and in the closest profile, size decreased from 0.5 to 1.0 cm and had no evidence of cracks (Figure 3).

Surface accumulations of organic matter (MO) were higher in BN (3.41 to 4.25%) and lower in BP and BB (0.97 to 1.22%). Organic amendments two weeks before the excavation of the BP profile increased the MO content (6.82%), in the surface

Cuadro 3. Prácticas agronómicas y la percepción de la descomposición de las raíces en el ejido Vega de Madero, Hidalgo según los productores.

Table 3. Agronomic practices and perception of decomposition of roots in the Vega de Madero ejido, Hidalgo, according to producers.

Manejo	Clase de Tierra			
	Barro Pardo		Barro con Tepetate Blanco	Barro Negro
Fertilización con Sulfato de Amonio (kg ha^{-1})	120-140		100	80
Aplicación de Enmiendas orgánicas	3 o 5 años		Cada año	Cada año
Condición Hídrica	Secano	Riego	Riego	Riego
Cultivo	Monocultivo	Monocultivo y Rotación	Monocultivo y Rotación	Monocultivo y Rotación
Descomposición de raíces (percepción del agricultor)	Muy lenta	Lenta	Lenta	Rápida

Cuadro 4. Propiedades edáficas y clasificación de suelos de las diferentes clases de tierra.

Table 4. Edaphic properties and classification of soils of the different land classes.

Horizonte	Prof. (cm)	Clase Textural	Color (10YR)		Dap (gcm^{-3})	BS (cm)	R (%)	MO (%)	CIC (Cmol kg^{-1})	pH
			Seco	Húmedo						
<i>Barro Pardo</i>										
Typic Dystrustepts (USDA)/ Regosol (Leptic-clayic) (WRB)										
Ap	0-8	Arcilla			1.65		60	0.97	35	6.8
Ap2	8-26	Arcilla			1.59		60	1.29	35	6.8
Bw	26-33	Arcilla	3/2	2/1	1.78		51	1.29	36	7.2
2Cr	33-45	Franco-Arcilloso			1.66		34	0.51	44	7.5
0.5-10										
Ap	0-13	Arcilla			1.79		59	6.82	35	6.5
Bw	13-35	Arcilla	3/2	2/1	1.88		61	1.03	22	7.1
2Cr	35-53	Arcilla			1.78		42	0.64	55	7.5
<i>Barro con tepetate blanco</i>										
Typic Dystrustepts (USDA)/ Regosol (Leptic-clayic) (WRB)										
Ap	0-13	Franco-Arcilloso			1.34		30	1.22	19	7.7
Ap2/C	13-25	Franco-Arcilloso			1.43		39	1.16	34	7.6
Cr	25-35	Franco-Arcillo-Arenoso	4/1	3/1	1.55	0.5-10	22	0.45	25	7.7
<i>Barro Negro</i>										
Udic Haplausterts (USDA)/Vertisol (Leptic-skeletal) (WRB)										
Ap	0-15	Arcilla			1.52		57	4.25	19	6.2
B _{ss}	15-40	Arcilla	2/1	2/1	1.63	0.5-2.5	60	1.54	31	7.0
B/C	40-55	Arcilla			1.54		66	0.58	39	7.7
<i>Barro Negro</i>										
Vertic Haplaustepts (USDA)/ Regosol (Leptic-protovetric) (WRB)										
Ap	0-15	Arcilla			1.64		51	3.41	33	5.9
B _{ss}	15-30	Arcilla	3/1	2/1	1.43	0.5-1.0	70	2.70	86	5.9

Prof: profundidad, R: arcillas, MO: materia orgánica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, Dap: densidad aparente y BS: bloques subangulares ♦ Depth: depth, R: clays, MO: organic matter, CIC: Cation-exchange capacity, Dap: bulk density and BS: sub-angular blocks.

Propiedades edáficas y clasificación taxonómica del suelo

En las clases BP y BB estructura fue muy desarrollada de bloques subangulares de tamaño grande (hasta 10 cm de longitud) y presencia de grietas (2 a 5 cm de grosor). En el caso de BN, el desarrollo estructural y grosor de las grietas disminuyó con el aumento de humedad en el suelo (por la cercanía con la presa). Los bloques subangulares fueron de 0.5 a 2.5 cm y grietas < 2 cm en el perfil más alejado y en el más cercano, el tamaño disminuyó de 0.5 a 1.0 cm y sin evidencia de grietas (Figura 3).

Las acumulaciones superficiales de materia orgánica (MO) fueron mayores en BN (3.41 a 4.25%) y las menores en BP y BB (0.97 a 1.22%). Las enmiendas orgánicas dos semanas antes de la excavación del perfil en BP incrementó el contenido de MO (6.82%), en el horizonte superficial. También, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el pH variaron entre las clases de tierra (de 19 a 85 Cmol kg⁻¹ y de neutros, 7.7 a ligeramente ácidos 5.9). La CIC mayor en BN correspondió con los contenidos altos de arcillas expansibles en suelos arcillosos en otras partes de Norteamérica (Coulombe *et al.*, 1996) y en el centro de México (Sotelo-Ruíz *et al.*, 2013).

En los perfiles de suelo se observaron horizontes endurecidos (tepetate) en BP y BB como se mencionó en la clasificación campesina de tierras (Figura 4). Estas capas están formadas por tobas volcánicas cristalíticas de riolita que han sido reportadas anteriormente como materiales parentales de suelos arcillosos en México (Sotelo-Ruíz *et al.*, 2013). Además, se registraron horizontes cámbicos (Bw) para BP con un incipiente proceso de vertizolitización.

Los productores mencionaron la presencia de tepetates en las tierras BN, pero los horizontes

horizontes. Also, cation exchange capacity (CIC) and pH varied between the types of land (from 19 to 85 Cmol kg⁻¹ and neutral, 7.7 to slightly acidic 5.9). The higher CIC in BN corresponded to the high contents of expandable clays in clay soils in other parts of North America (Coulombe *et al.*, 1996) and in central Mexico (Sotelo-Ruíz *et al.*, 2013).

In the soil profiles, hardened horizons (Tepetate) were observed in BP and BB as mentioned in the farmer land classification (Figure 4). These layers are formed by rhyolite crystal tuffs that Mg have been previously reported as parental materials of clay soils in Mexico (Sotelo-Ruíz *et al.*, 2013). Cambic horizons (Bw) were recorded for BP with an incipient process to forming vertisols (vertizolitization).

The producers mentioned the presence of Tepetates in BN lands, but the hardened horizons that were observed were lithic contacts of basalt fragments (>70 cm). In the most distant case to the dam, slip faces were recognized and soil was classified as Vertisol; in the soil profile and areas near the dam these features were rare, and the soil was classified as Inceptisol. The low presence of vertic properties was related to the increase in soil moisture content due to its proximity to the dam, which modifies the soil moisture regime and limits the expansion and contraction, as indicated by Gutiérrez-Castorena *et al.* (2015) and Pal (2017) in soils of irrigation districts.

According to the IUSS Working Group WRB (2015), soils in the study area correspond to Regosols and Vertisols; this classification is different from that of INEGI (2015), which includes the presence of Phaeozems and Vertisols. Regosols within the lands of BP and BB have the same qualifiers (leptic-clayic) for their depth and clay content; while, in BN the qualifiers are leptic-protovetic, due to the presence



Figura 3. Estructura del suelo: a) tierra barro pardo, b) barro con tepetate blanco y c) barro negro.
Figure 3. Soil structure: a) Brown clayey land, b) clayey with white Tepetate and c) black clayey.

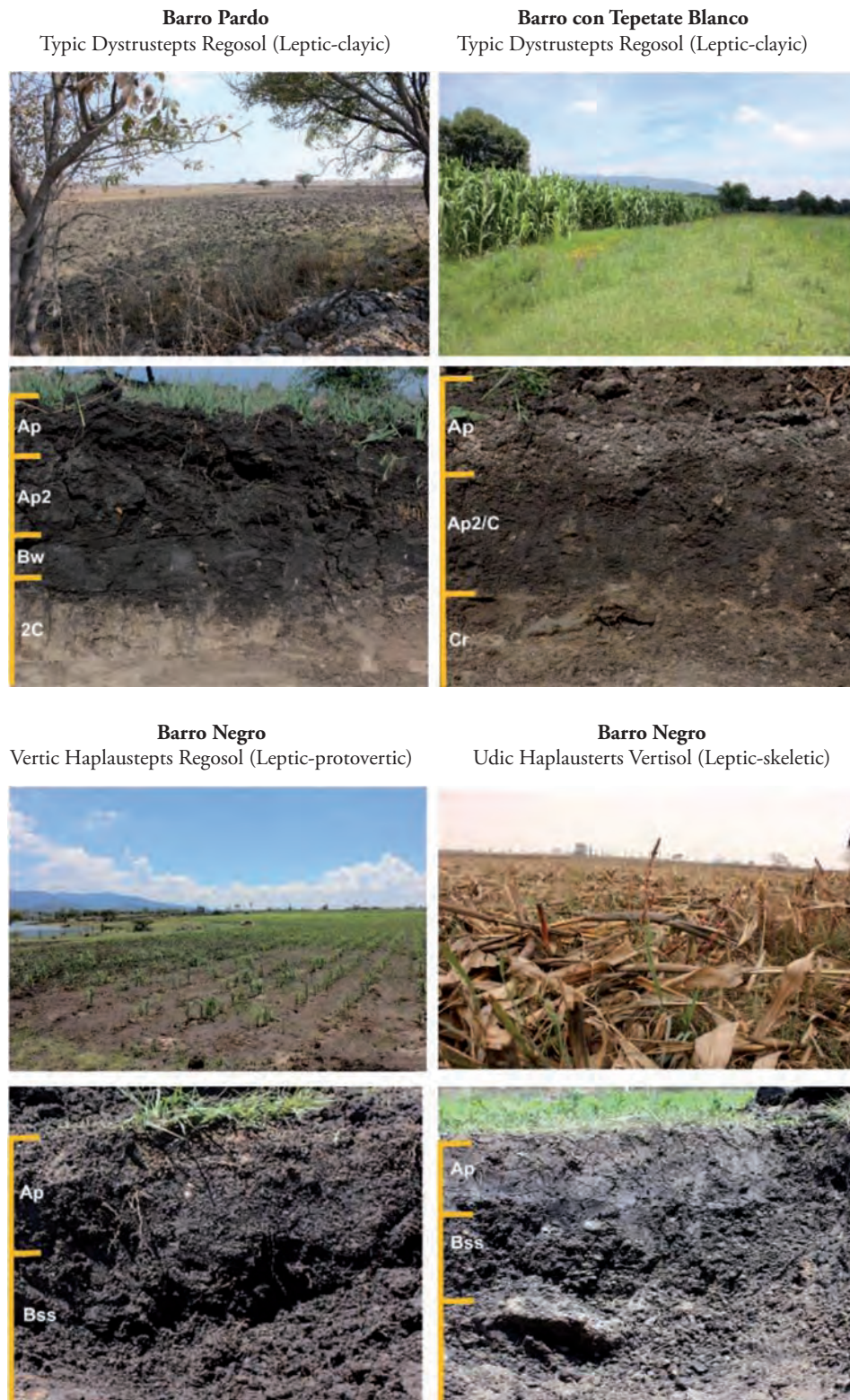


Figura 4. Perfiles de suelos y su asociación con el paisaje de las diferentes clases de tierras.
Figure 4. Soil profiles and their association with the landscape of different types of land classes.

endurecidos que se observaron fueron contactos líticos de fragmentos de basalto (>70 cm). En el caso más distante de la presa se reconocieron caras de deslizamiento y el suelo fue clasificado como Vertisol; en el perfil y las zonas cercanas a la presa estos rasgos fueron poco frecuentes y el suelo se clasificó como Inceptisol. La presencia escasa de propiedades vérticas se relacionaron con el aumento en el contenido de humedad por su proximidad con la presa que modifica el régimen de humedad y limita la expansión y contracción, como lo señalan Gutiérrez-Castorena *et al.* (2015) y Pal (2017) en suelos de distritos de riego.

Según el IUSS Working Group WRB (2015), los suelos en la zona de estudio son Regosoles y Vertisoles; esta clasificación es diferente a la de INEGI (2015) que incluye presencia de Phaeozems y Vertisoles. Los Regosoles, dentro de las tierras de BP y BB, poseen los mismos calificadores (leptic-clayic) por su profundidad y contenido de arcilla; mientras que, en BN los calificadores son leptic-protovértic, por la presencia de caras de deslizamiento. Los Vertisoles ocurren cuando el espesor del suelo con propiedades vérticas se incrementa y la presencia de rocas (<50 cm de profundidad) y un estrato endurecido (<100 cm de profundidad) determina a los calificadores leptic-skeletal.

Según las claves para la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 2014) se presentan dos órdenes: Inceptisols y Vertisols, en donde el régimen de humedad, la CIC y espesor del horizonte con propiedades vérticas (agregados cuneiformes y caras de deslizamiento) determinaron su clasificación. Los Typic Dystrustepts son comunes en BP y BB; en tanto que los Vertic Haplaustepts y Udic Haplaustepts se presentan en BN, donde el proceso de vertizolitización y el régimen de humedad del suelo establecieron la clasificación. De nuevo, la cercanía de los suelos con la presa modifica el cambio en el régimen de humedad del suelo (de ústico a údico) como lo señalaron Gutiérrez-Castorena *et al.* (2015).

En comparación con el conocimiento técnico de suelos, el conocimiento local de tierras es más detallado a nivel superficial e integral, ya que incorpora conceptos que no son propiamente edáficos y que involucran aspectos socioculturales para determinar las clases de tierra presentes, su calidad y productividad como ha sido detallado y revisado en diversos manuscritos como los de Williams y Ortiz, (1981); Ortiz-Solorio y Gutiérrez-Castorena (2001) y Krasilnikov

of slickensides. Vertisols occur when the soil thickness with vertic properties increases and the presence of rocks (< 50 cm deep) and a hardened layer (< 100 cm deep) determines the leptic-skeletal qualifiers.

According to Soil Survey Staff (2014) two orders are presented: Inceptisols and Vertisols, where the soil moisture regime, the CIC and the thickness of the horizon with vertic properties (cuneiform aggregates and slickenside) determined their classification. Typic Dystrustepts are common in BP and BB; while the Vertic Haplaustepts and Udic Haplaustepts are presented in BN, where the vertizolitization process and the soil moisture regime established the classification. Again, the proximity of the soils with the dam modifies soil moisture regime (from ustic to udic) as noted by Gutiérrez-Castorena *et al.* (2015).

Compared to the technical soil knowledge, local soil knowledge is more detailed at the superficial and integral level, since it incorporates concepts that are not properly edaphic and that involve sociocultural aspects to determine the current land classes. Quality and productivity of land classes have been detailed and reviewed in various manuscripts, such as those of Williams and Ortiz, (1981), Ortiz-Solorio and Gutiérrez-Castorena (2001) and Krasilnikov (2002); while, with the technical classifications (Soil Taxonomy and the Soils World Reference Base) more information is obtained at the vertical level and other edaphic properties. These apparent disagreements between knowledge are due to the conceptualization of land (soil) by local producers and the technical soil knowledge. What initially seemed a two-dimensional concept for local soil knowledge (Williams and Ortiz-Solorio, 1981) was demonstrated in later works, in which both concepts incorporate three dimensions, and give greater importance to the top soil (Ortiz-Solorio and Gutiérrez-Castorena, 2001).

Researches who combine both knowledges (without losing any of its properties) have generated a convenient bridge between technical knowledge and producers to generate detailed and more accurate mapping information than that of soil survey conducted by INEGI (Lleverino *et al.*, 2000). Process has also allowed detailed knowledge on types of crops, cultivation works, fertilizers, weeds and land management and recovery (Ortiz-Solorio and Gutiérrez-Castorena, 2001). Furthermore, technology transfer adapted to specific regions can be carried out (Licona *et al.*, 2006), as well as the

(2002); mientras que, con las clasificaciones técnicas (Soil Taxonomy y la Base Referencial Mundial del Suelo) se obtiene mayor información a nivel vertical y otras propiedades edáficas. Estas aparentes discordancias entre conocimientos se deben a la conceptualización de la tierra (suelo) por parte de los productores locales y el técnico. Lo que en un principio pareció un concepto bidimensional para el conocimiento local (Williams y Ortiz-Solorio, 1981), se demostró en trabajos posteriores que ambos conceptos incorporan tres dimensiones, pero el conocimiento local da mayor importancia a la capa superficial (Ortiz-Solorio y Gutiérrez-Castorena, 2001).

Las investigaciones que conjuntan ambos conocimientos (sin que ninguno pierda sus propiedades) ha generado un puente entre técnicos y productores conveniente para generar información cartográfica detallada y más precisa que la de fuentes oficiales, como INEGI (Lleverino *et al.*, 2000). También, ha permitido el conocimiento detallado en tipos de cultivos, labores de cultivo, abonos, arvenses y manejo y recuperación de tierras (Ortiz-Solorio y Gutiérrez-Castorena, 2001). Además, se puede hacer transferencia de tecnología adaptada a regiones específicas (Licona *et al.*, 2006), uso de implementos agrícolas y desarrollo de estrategias para sistemas de producción (Sánchez-Guzmán *et al.*, 2002).

Descomposición de raíces

Los productores identifican las siguientes “velocidades de descomposición” (término empleado por los productores), según la presencia de raíces finas y gruesas, entre el periodo de cosecha y preparación del siguiente ciclo: (1) muy lenta, con abundantes raíces finas y gruesas; (2) lenta, con raíces finas y gruesas; y (3) rápida, con raíces finas y pocas raíces gruesas.

Con base en esta clasificación, las tierras BN tienen una descomposición rápida y las clases BB y BP presentan una descomposición lenta (Figura 2). Sin embargo, los productores también indican que la condición hídrica del cultivo afecta la velocidad de descomposición de las raíces. Al estar bajo condiciones de secano en BP se presenta la descomposición muy lenta.

Descomposición muy lenta

En secano las tierras de BP tienen la tasa menor de mortalidad radical (0.008) lo que concuerda con

use of agricultural implements and development of strategies for production systems (Sánchez-Guzmán *et al.*, 2002).

Roots decomposition

Producers identify the following “decomposition speeds” (term used by producers), according to the presence of fine and thick roots between the harvest period and preparation of the following cycle: (1) very slow, with abundant fine and thick roots; (2) slow, with fine and thick roots; and (3) fast, with fine roots and few thick roots.

Based on this classification, BN lands have a fast decomposition and BB and BP types have a slow decomposition (Figure 2). However, producers also indicate that the water condition of the crop affects the speed of root decomposition. Being under rainfed conditions in BP, very slow decomposition occurs.

Very slow decomposition

In rainfed conditions, BP lands have the lowest radical mortality rate (0.008), which is consistent with the local soil knowledge, who recognize the lower decomposition when there is no irrigation in the plots.

Rainfed water condition and monoculture maize in BP-t-m presented statistical differences for the two crop cycles in the biomass variables (1.50 and 0.57 Mg ha⁻¹) and radical density (0.87 and 0.53 cm cm⁻³ soil) with respect to the treatment with irrigation and monoculture (BP-i-r) where the biomass values (2.27 and 1057 Mg ha⁻¹) and the radical density (1.31 and 1.21 cm cm⁻³ soil), were twice as high.

Very slow decomposition is related to soil moisture and the type of crop that affects root production and mortality. Low soil moisture contents favor the expansion and contraction movements, formation of cracks and loss in the continuity of the pores that prevent optimal root growth (Coulombe *et al.*, 1996). In addition, low moisture limits the biological activity in the soil (Hulugalle *et al.*, 2015), and the use of monocultures generates less productivity and mortality compared to rotations (Linh *et al.*, 2015).

Slow decomposition

According to the biomass, density, productivity and relative mortality of the roots in the in-growth

el conocimiento de los productores locales, que reconocen la descomposición menor cuando no hay riego en las parcelas.

La condición hídrica de temporal y monocultivos de maíz en BP-t-m, presentó diferencias estadísticas para los dos ciclos de cultivo en los variables de biomasa (1.50 y 0.57 Mg ha⁻¹) y densidad radical (0.87 y 0.53 cm cm⁻³ suelo) con respecto al tratamiento con riego y monocultivo (BP-i-r) en donde los valores de biomasa (2.27 y 1.057 Mg ha⁻¹) y la densidad radical (1.31 y 1.21 cm cm⁻³ suelo), son dos veces más altos.

La descomposición muy lenta está relacionada con la humedad del suelo y el tipo de cultivo que afecta la producción y mortalidad de las raíces. Los contenidos bajos de humedad favorecen los movimientos de expansión y contracción, la formación de grietas y pérdida en la continuidad de los poros que impide el crecimiento óptimo de las raíces (Coulombe *et al.*, 1996). Además, limitan la actividad biológica del suelo (Hulugalle *et al.*, 2015) y el uso de monocultivos genera menos productividad y mortalidad respecto a las rotaciones (Linh *et al.*, 2015).

Descomposición lenta

De acuerdo con la biomasa, densidad, productividad y mortalidad relativa de las raíces en los núcleos de crecimiento interno todos los tratamientos de BP y BB fueron estadísticamente similares en monocultivos y rotaciones (Cuadro 5). Esto concordó con la descomposición lenta mencionada por los productores.

Este fenómeno se puede explicar a través de la Dap, donde los valores obtenidos (1.4 - 1.7 g cm⁻³) para BP están por encima de los críticos (1.37 g cm⁻³) para el crecimiento temprano de las raíces de maíz en Vertisols (Wilson *et al.*, 2013), lo cual provocó que la producción y descomposición de las raíces fuera limitada. Sin embargo, en tierras de BB, la Dap superficial fue de 1.34 g cm⁻³ y no se produjeron más raíces que en BP, por lo que otros factores están interactuando. De acuerdo con Bravo-Garza *et al.* (2010) e Inoubli *et al.* (2016) los procesos de humedecimiento y secado, el contenido de MO o el contenido de arcillas expansibles pueden ejercer influencia sobre el crecimiento y mortalidad de las raíces.

Además, los altos contenidos de arcillas expansibles 2:1 comunes en Vertisoles (Buol *et al.*, 2011) y

cores, all BP and BB treatments were statistically similar in monocultures and rotations (Table 5). This fact agreed with the slow decomposition mentioned by the producers.

This phenomenon can be explained through the bulk density, where the values obtained (1.4-1.7 g cm⁻³) for BP are above the critical ones (1.37 g cm⁻³) for early growth of maize roots in Vertisols (Wilson *et al.*, 2013), causing root production and decomposition to be limited. However, in BB lands, the bulk density of the top horizon was 1.34 g cm⁻³ and no more roots were produced than in BP, therefore, other factors interacted. According to Bravo-Garza *et al.* (2010) and Inoubli *et al.* (2016) wetting and drying processes, MO content or the content of expandable clays can influence the growth and mortality of the roots.

Additionally, the high contents of 2:1 expandable clays common in Vertisols (Buol *et al.*, 2011) and the periods in which the water holding capacity was low (<25%), as occurs in the BP and BB lands, contributed to crack formation and strong aggregate development (Bravo-Garza *et al.*, 2005); consequently, they interrupted root growth (Coulombe *et al.*, 1996).

Root replacement index is a concept introduced by Cheng *et al.* (1990) to describe the speed of production or death of the roots and it is the mean of the rates of productivity and mortality but does not provide information about which process is dominant. The values (< 0.04) obtained in BP, BP and BN in monocultures, and BP and BB in rotations show low production or death of roots. Even when organic amendments with a high MO content (6.82%) were incorporated, these additions were not enough to improve aggregate formation and increasing soil biological activity (Rahman *et al.*, 2016). Nevertheless, in BN with crop rotation the replacement index (0.128) showed that more roots are produced than those that die monthly. When this parameter was related to the others, none obtained $r^2 > 0.7$, which demonstrates that the high turnover rates are due to the combination of several factors such as soil moisture, land classes and crop rotation.

Fast decomposition

Roots decomposition is fast due to the greater availability of soil moisture given the proximity to the dam, irrigation canals and accessibility of

Cuadro 5. Valores promedio de algunos parámetros radicales de maíz en las diferentes clases de tierra del ejido Vega de Madero, Hidalgo en los ciclos de cultivo 2015 y 2016.

Table 5. Average values of some radical variables of maize in the different land classes of the Vega de Madero ejido, Hidalgo, Mexico in the 2015 and 2016 crop cycles.

Tratamiento	Riego + Monocultivo		Tratamiento	Riego + Rotación	
	2015	2016		2015	2016
	<i>Biomasa radical (t ha⁻¹)</i>			<i>Biomasa radical (t ha⁻¹)</i>	
BP-i-m	2.274 ^a	1.057 ^a	BP-i-r	2.003 ^a	0.901
BB-i-m	2.510 ^a	0.991 ^a	BB-i-r	1.645 ^a	
BN-i-m	2.616 ^a		BN-i-r	9.172 ^b	
	Tasa de mortalidad relativa			Tasa de mortalidad relativa	
BP-i-m	0.014 ^a	0.021 ^a	BP-i-r	0.011 ^a	0.023
BB-i-m	0.025 ^a	0.026 ^a	BB-i-r	0.024 ^a	
BN-i-m	0.010 ^a		BN-i-r	0.047 ^b	
	Tasa de productividad relativa			Tasa de productividad relativa	
BP-i-m	0.041 ^a	0.036 ^a	BP-i-r	0.035 ^a	0.018
BB-i-m	0.043 ^a	0.038 ^a	BB-i-r	0.036 ^a	
BN-i-m	0.044 ^a		BN-i-r	0.200 ^b	
	Aporte de C (t ha ⁻¹)			Aporte de C (t ha ⁻¹)	
BP-i-m	0.916 ^a	0.426 ^a	BP-i-r	0.803 ^a	0.360
BB-i-m	0.996 ^a	0.393 ^a	BB-i-r	0.658 ^a	
BN-i-m	0.803 ^a		BN-i-r	4.171 ^b	
	Índice de recambio			Índice de recambio	
BP-i-m	0.028 ^a	0.029 ^a	BP-i-r	0.024 ^a	0.021
BB-i-m	0.031 ^a	0.030 ^a	BB-i-r	0.036 ^a	
BN-i-m	0.027 ^b		BN-i-r	0.128 ^b	
	Humedad (%)			Humedad (%)	
BP-i-m	25 ^a	19 ^a	BP-i-r	25 ^a	20 ^a
BB-i-m	25 ^a	15 ^a	BB-i-r	26 ^a	20 ^a
BN-i-m	28 ^a	28 ^b	BN-i-r	32 ^b	31 ^b

†Columnas con letras diferentes muestran diferencias estadísticas entre tratamientos. BP: Barro pardo, BB: Barro con tepetate blanco, BN: Barro negro. En el ciclo de cultivo 2016 sólo se instalaron cuatro tratamientos debido a la renta de parcelas para cultivo de hortalizas ♦ Columns with different letters show statistical differences among treatments. BP: Brown clayey, BB: Clayey with white Tepetate, BN: Black clayey. In the 2016 crop cycle, only four treatments were installed due to the rental of plots for vegetable cultivation.

los periodos en donde el contenido de humedad fue bajo (< 25%), como ocurre en las tierras BP y BB, contribuyeron a la formación de grietas y al desarrollo fuerte de los agregados (Bravo-Garza *et al.*, 2005); en consecuencia, interrumpieron el crecimiento de las raíces (Coulombe *et al.*, 1996).

El índice de recambio de las raíces es un concepto introducido por Cheng *et al.* (1990) para describir la velocidad de producción o muerte de las raíces y es la media de las tasas de productividad y mortalidad, pero no ofrece información acerca de cuál proceso es dominante. Los valores (< 0.04) obtenidos en BP, BP y BN en los monocultivos, y BP y BB en las rotaciones demuestran producción baja o muerte de raíces.

machinery and frequency implementation (once a year) of manure or organic amendments. This occurs only as crop rotation in BN lands. Laboratory data showed that fast decomposition occurs with crop rotation and higher water holding capacity (> 30%), which prevents the formation of cracks and increases the stability of soil aggregates (Bravo-Garza *et al.*, 2009). In the treatments with crop rotation there were significant differences, two and six times more mortality and relative productivity, and up to 4.5 times more root biomass with the other types of land.

The monthly roots decomposition in the crop rotation in BN, expressed as radical density, showed significant differences during the 2015 crop cycle

Aun cuando se incorporaron enmiendas orgánicas con un alto contenido de MO (6.82%), estas adiciones no fueron suficientes para mejorar la formación de agregados y aumentar la actividad biológica del suelo (Rahman *et al.*, 2016). Sin embargo, en BN con rotación el índice de recambio (0.128) mostró que se producen más raíces de las que mueren mensualmente. Cuando se relacionó este parámetro con los demás, ninguno obtuvo $r^2 > 0.7$ lo que demuestra que las altas tasas de recambio se deben a la combinación de varios factores como la humedad, clase de tierra y rotación de cultivos.

Descomposición rápida

La descomposición de las raíces es rápida por la disponibilidad mayor de humedad por cercanía a la presa, canales de riego y accesibilidad de maquinaria y aplicación frecuencia (una vez por año) de estiércoles o enmiendas orgánicas. Esto ocurre sólo con la rotación de cultivos en las tierras BN. Los datos de laboratorio mostraron que la descomposición rápida se presenta con la rotación de cultivos y mayor humedad (> 30%), lo que impide la formación de grietas y aumenta la estabilidad de los agregados del suelo (Bravo-Garza *et al.*, 2009). En los tratamientos con rotación de cultivos se presentaron diferencias significativas, dos y seis veces más mortalidad y productividad relativa, y hasta 4.5 veces más biomasa radical con las otras clases de tierra.

La descomposición mensual de las raíces en la rotación de cultivos en BN, expresada como densidad radical, mostró diferencias significativas durante el ciclo de cultivo 2015 (8.11, 6.07, 5.95 y 3.92 cm cm⁻³ suelo) en comparación con los otros tratamientos (Figura 5). La rotación de cultivos aumentó la producción y descomposición de las raíces. Esto coincide con lo reportado por Linh *et al.* (2015), van Noordwijk *et al.* (1994) y Mu *et al.* (2016) en diferentes cultivos. Esta práctica mejora la estructura del suelo por la incorporación MO de la descomposición de raíces de cultivos anteriores y expande la zona de enraizamiento (Linh *et al.*, 2015). Además, al mejorar la estabilidad de los agregados (Bravo-Garza *et al.*, 2010), disminuye el número y la magnitud de grietas en Vertisols (López-Bellido *et al.*, 2016), incrementa la retención de agua (Bhagat y Verma, 1991).

El porcentaje promedio de C en las raíces de cultivo con rotación presentó los valores mayores:

(8.11, 6.07, 5.95 and 3.92 cm cm⁻³ soil) compared to the other treatments (Figure 5). Crop rotation increased root production and decomposition. This coincides with the reports by Linh *et al.* (2015), van Noordwijk *et al.* (1994) and Mu *et al.* (2016) in different crops. Crop rotation improves the soil structure by incorporating MO from roots decomposition of the previous crops and expands the rooting zone (Linh *et al.*, 2015). Furthermore, by improving aggregate stability, the number and extent of cracks in Vertisols (López-Bellido *et al.*, 2016) decreases, water retention increases (Bhagat and Verma, 1991), aggregate infiltration (Chilundo *et al.*, 2017) and stability decreases (Bravo-Garza *et al.*, 2010).

The average percentage of C in crop roots with rotation had the highest values: 45.48% (BN), 40.11% (BP), 40.02% (BB) compared to monocultures: 40.02% (BP), 39.68% (BB) and 30.46% (BN). These results coincided with those of the literature (Steingrobe *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2015). The contribution of C to the soil by roots in BN-i-r was up to 400% higher than in the other treatments. Although the contribution of C by the roots is 10%, as demonstrated by Wang *et al.* (2015) and Zhang *et al.* (2015), the capacity in BN with crop rotation can be 40 times higher than in other types of soil.

Water holding capacity presented significant differences in BN-i-r, this indicates that it affects the radical variables. However, no relations were identified with the turnover index, productivity and root mortality ($R^2 < 0.5$). Moisture soil content indirectly affects the radical variables, as it generates structure collapse and alters soil aeration (Czyż, 2004).

CONCLUSIONS

Local farmers soil knowledge identified land classes where the roots decompose with the highest speed, classified as very slow, slow and fast intensity according to the presence of fine and thick roots between harvest period and preparation of the next cycle. These speeds correspond to the relative mortality rates calculated using technical knowledge.

The in-growth cores demonstrate that crop rotation and the type of land classes are factors that directly influence production and decomposition of

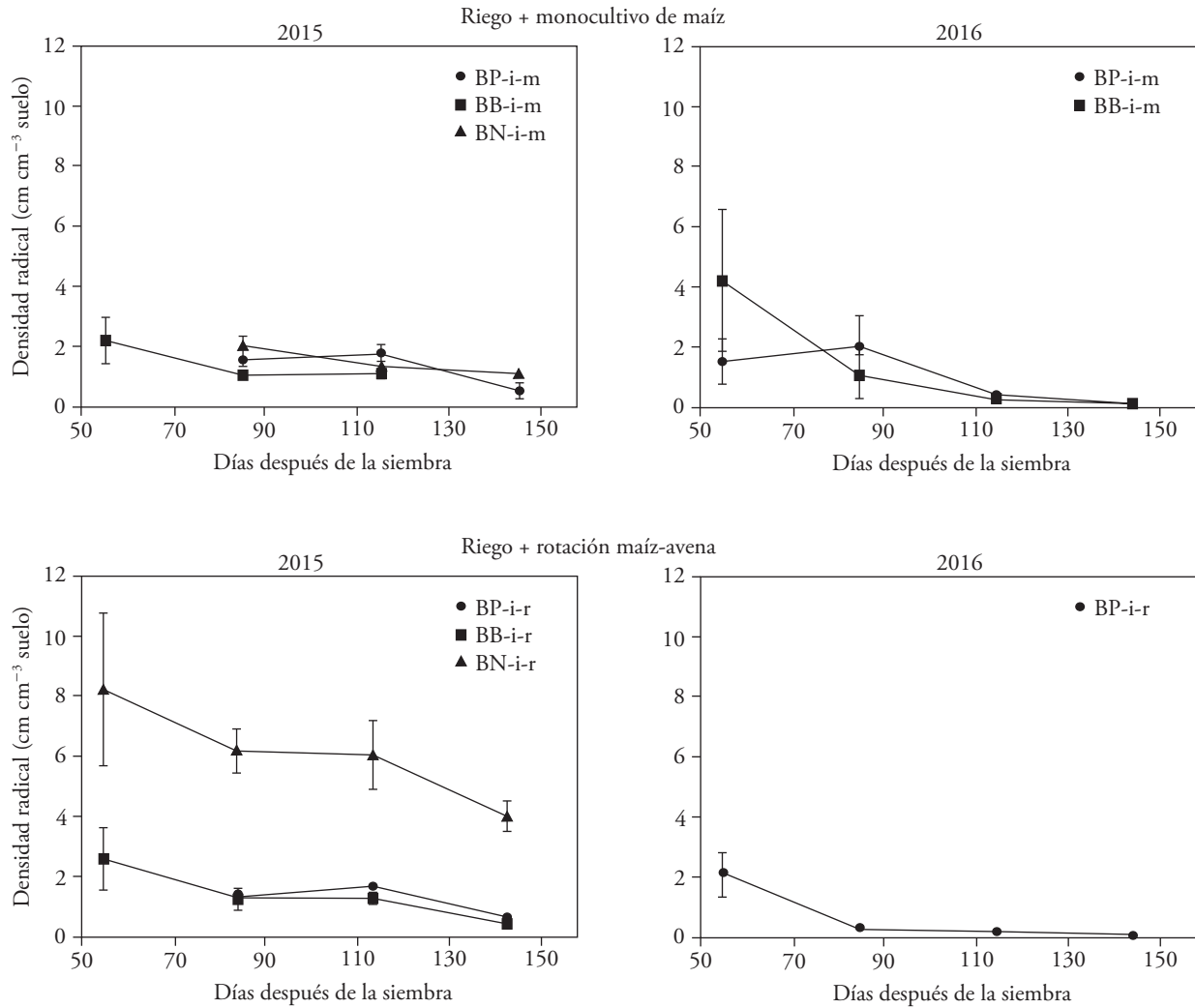


Figura 5. Longitud de las raíces de maíz en descomposición en los ciclos de cultivo 2015 y 2016. BP: Barro Pardo, BB: Barro con Tepetate Blanco, BN: Barro Negro, i: riego, m. monocultivo y r: rotación. Líneas verticales en los puntos representan el error estándar de la media de los tratamientos

Figure 5. Length of decomposing maize roots in the 2015 and 2016 crop cycles. BP: Brown clayey, BB: Clayey with white Tepetate, BN: Black clayey, i: irrigation, m. monoculture and r: rotation. Vertical lines at the points represent the standard error of the treatments mean.

45.48% (BN), 40.11% (BP), 40.02% (BB) respecto a los monocultivos: 40.02% (BP), 39.68% (BB) y 30.46% (BN). Estos resultados coincidieron con los de la literatura (Steingrobe *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2015). El aporte de C al suelo por las raíces en BN-i-r fue hasta 400% mayor que en los demás tratamientos. Aunque la contribución de C por las raíces sea 10%, como lo demostraron Wang *et al.* (2015) y Zhang *et al.* (2015), la capacidad en BN con rotación de cultivos puede ser 40 veces mayor que en otras clases de suelo.

maize roots; soil moisture intervenes indirectly since it reduces the contraction of soil aggregates and the formation of cracks in the nearby plots.

The interaction of local and technical soil knowledge allows locating the spatial distribution of root decomposition and obtaining information on radical variables and crop management to regionalize the information in detailed mapping.

—End of the English version—



El contenido de humedad presentó diferencias significativas en BN-i-r, esto indica que afecta los variables radicales. Sin embargo, no se identificaron relaciones con el índice de recambio, productividad y mortalidad de las raíces ($R^2 < 0.5$). El contenido de humedad afecta indirectamente a los variables radicales, pues genera colapso de la estructura y altera la aireación del suelo (Czyż, 2004).

CONCLUSIONES

El conocimiento campesino identificó la clase de tierra donde se descomponen las raíces con mayor velocidad, clasificada como intensidad muy lenta, lenta y rápida según la presencia de raíces finas y gruesas entre el periodo de cosecha y preparación del siguiente ciclo. Estas velocidades corresponden a las tasas de mortalidad relativa calculadas mediante conocimiento técnico.

Los núcleos de crecimiento interno demuestran que la rotación de cultivos y la clase de tierra son factores que influyen directamente en la producción y descomposición de las raíces de maíz; la humedad interviene indirectamente ya que reduce la contracción de los agregados y la formación de grietas en las parcelas cercanas.

La interacción del conocimiento local y técnico de suelos permite ubicar la distribución espacial de la descomposición de raíces y obtener información de variables radicales y manejo de las parcelas de cultivo, para regionalizar la información en cartografía detallada.

LITERATURA CITADA

- Albino-Garduño, R., A. Turrent-Fernández, J. I. Cortés-Flores, M. Livera-Muñoz, y M. C. Mendoza-Castillo. 2015. Distribución de raíces y de radiación solar en el dosel de maíz y frijol intercalados. *Agrociencia* 49: 513 - 531.
- Alfaro, O., E.R., C.A. Ortiz-Solorio, C.A. Tavarez E., M.C. Gutiérrez-Castorena, y A. Trinidad S. 2000. Clasificaciones técnicas de suelos en combinación con el conocimiento local sobre tierras, en Santa María Jalpa, estado de México. *Terra Latinoam.* 18: 93 - 101.
- Arroita, M., J. Causapé, F.A. Comín, J. Díez, J. J. Jimenez, J. Lacarta, C. Lorente, D. Merchán, S. Muñoz, E. Navarro, J. Val, and A. Elozegi. 2013. Irrigation agriculture affects organic matter decomposition in semi-arid terrestrial and aquatic ecosystems. *J. Hazard. Mater.* 263: 139 - 145.
- Bhagat, R. M., and T. S. Verma. 1991. Impact of rice straw management on soil physical properties and wheat yield. *Soil Sci.* 152: 108 - 115.
- Bloomfield, J., K. A. Vogt, and P. M. Wargo. 1996. Tree root turnover and senescence. In: Waisel Y., A. Eshel and U. Kafafi (eds) *Plant roots: the hidden half*, 2nd ed. Dekker, New York. pp: 363 - 381.
- Bravo-Garza, M. R., and R. B. Bryan. 2005. Soil properties along cultivation and fallow time sequences on Vertisols in Northeastern Mexico. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 473 - 481.
- Bravo-Garza, M. R., R. B. Bryan, and P. Voroney. 2009. Influence of wetting and drying cycles and maize residue addition on the formation of water stable aggregates in Vertisols. *Geoderma* 151: 150 - 156.
- Bravo-Garza, M. R., P. Voroney, and R. B. Bryan. 2010. Particulate organic matter in water stable aggregates formed after the addition of ^{14}C labeled maize residues, wetting, and drying cycles in Vertisols. *Soil Biol. Biochem.* 42: 953 - 959.
- Buol, S. W., R. J. Southard, R. C. Graham, and P. A. McDaniel. 2011. *Soil Genesis and Classification*, 6th edition. Wiley-Blackwell. Hoboken, NJ. 543 p.
- Canadell J. G., C. L. Quéré, M. R. Raupach, C. B. Field, E.T. Buitehuis, P. Ciais, T. J. Conway, N. P. Gillett, R. A. Houghton, and G. Marland. 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO_2 growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *PNAS.* 104: 18866 - 18870.
- Cheng W., D. C. Coleman, and J. E. Box. 1990. Root dynamics, production and distribution in an agroecosystem on the Georgia piedmont using minirhizotrons. *J. Appl. Ecol.* 27: 592 - 604.
- Chilundo, M., A. Joel, I. Westrom, B. Rui., and I. Messing. 2017. Response of maize root growth to irrigation and nitrogen management strategies in semi-arid loamy sandy soil. *Field Crop Res.* 200: 143 - 162.
- Coulombe, C. E., L. P. Wilding, and J. B. Dixon. 1996. Overview of Vertisols: characteristics and impacts on society. *Adv. Agron.* 57: 289 - 375.
- Cuanalo de la C., H. 1990. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. Tercera edición. Centro de edafología. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 49 p.
- Czyż, E. A. 2004. Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley, *Soil Till. Res.* 79: 153 - 166.
- Gill, R., and R. B. Jackson. 2000. Global Patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytol.* 81: 275 - 280.
- Gutiérrez-Castorena, E. V., M. C. Gutiérrez-Castorena, and C. A. Ortiz-Solorio. 2015. Carbon capture and pedogenetic processes by change of moisture regime and conventional tillage in Aridisols. *Soil Till. Res.* 150: 114 - 123.
- Hulugalle R., K. J. Nilantha, D. K. Broughton, and Y. Tan. 2015. Fine root production and mortality in irrigated cotton, maize and sorghum sown in Vertisols of northern New South Wales, Australia. *Soil Till. Res.* 146: 313 - 322.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2015. Censo de Población y vivienda 2010. Mapa digital de México V6.1. <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/> (Consultado: marzo 2015).
- Inoubli, N., D. Raclot, R. Moussa, H. Habaieb, and Y. Le Bissonais. 2016. Soil cracking effects on hydrological and erosive processes: a study case in Mediterranean cultivated vertisols. *Hydrol. Process.* 30: 4154 - 4167.
- IUSS Working Group WRB (The International Union of Soil Sciences - Working Group for Soils World Reference Base).

2015. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps (update 2015) World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. 192 p.
- Krasilnikov, P. V. 2002. Soil Terminology and Correlation (2nd edition) Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS. Translation of Soil Classification of Russia. 1997. Soil Science Institute Moscow, Russia. 236 p.
- Krasilnikov, P., M. C. Gutiérrez-Castorena, R. J. Ahrens, C. O. Cruz-Gaistardo, S. Sedov, and E. Solleiro-Rebolledo. 2013. The Soil of Mexico. World Soil Series. Springer Verlag, Netherlands. 181 p.
- Licona, A., C. A. Ortiz-Solorio, M. C. Gutiérrez-Castorena, y F. Manzo. 2006. Clasificación local de tierras y tecnología del policultivo café plátano para velillo-sombra en comunidades cafetaleras. *Terra* 24: 1 - 7.
- Lin T. B., T. Sleutel, V. T. Guong, L.V. Khoa, and W. Cornelis. 2015. Deeper tillage and root growth in annual rice-upland cropping systems result in improved rice yield and economic profit relative to rice monoculture. *Soil Till. Res.* 154: 44 - 52.
- Lleverino, G., E., C. A. Ortiz-Solorio, y M. C. Gutiérrez-Castorena. 2000. Calidad de los mapas de suelos en el ejido de Atenco, Estado de México. *Terra*. 18: 103 - 113.
- López-Bellido, R. J., V. Muñoz-Romero, F. J. López-Bellido, C. Guzmán, and L. López-Bellido, 2016. Crack formation in a mediterranean rainfed Vertisol: Effects of tillage and crop rotation. *Geoderma* 281: 127 - 132.
- Mu, X., Y. Zhao, K. Liu, B. Ji, H. Guo, Z. Xue, and C. Li. 2016. Responses of soil properties, root growth and crop yield to tillage and crop residue management in a wheat-maize cropping system on the North China Plain. *Eur. J. Agron.* 78: 32 - 43.
- Newman E. I., 1966. A method of estimating the total length of root in a sample. *J. of Appl. Ecol.* 3: 139 - 145.
- Ortiz-Solorio, C. A., 2010. Edafología. 8ª Edición. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco. 327 p.
- Ortiz-Solorio, C. A., y M. C. Gutiérrez-Castorena. 2001. La Etnoedafología en México: Una Visión Retrospectiva. *Rev. Etnobiología* 1: 44 - 62.
- Ortiz-Solorio, C. A., D. Pájaro-Huertas, y V. M. Ordaz-Chaparro. 1990. Manual para la cartografía de clases de tierras campesinas. Serie Cuadernos de Edafología 15. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 59 p.
- Pal, D. K. 2017. Cracking Clay Soils (Vertisols): Pedology, Mineralogy and Taxonomy. In: *A Treatise of Indian and Tropical Soils*. Springer, Cham. pp: 9-82.
- Rahman, M. T., Q. H. Zhu, Z. B. Zhang, H. Zhou, and X. Peng. 2016. The roles of organic amendments and microbial community in the improvement of soil structure of a Vertisol, *Appl. Soil Ecol.* 11: 84 - 93.
- Reséndiz-Paz, M. L., M. D. Gutiérrez-Castorena, E. V. Gutiérrez-Castorena, C. A. Ortiz-Solorio, L. Cajuste-Bontemps, and P. Sánchez-Guzmán. 2013. Local soil knowledge and management of Anthrosols: A case study in Teoloyucan, Mexico. *Geoderma* 193: 41 - 51.
- Sánchez-Guzmán, P., C. A. Ortiz-Solorio, M. C. Gutiérrez-Castorena, y J. D. Gómez-Díaz. 2002. Clasificación campesina de tierras y su relación con la producción de caña de azúcar en el sur de Veracruz. *Terra Latinoamer.* 20: 359 - 369.
- Seiffert, S., J. Kaselowsky, A. Jungk, and N. Claassen. 1995. Observed and calculated potassium uptake by maize as affected by soil water content and bulk density. *Agron. J.* 87: 1070 - 1077.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). 2017. Información climatológica por estado. <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=hgo> (Consultado: abril 2017).
- Silver, W., and Miya, R. 2001. Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects. *Oecol.* 129: 407 - 419.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12th edition. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. A Soil Survey Staff publication. Washington, D.C. USA. 360 p.
- Sotelo-Ruiz, E. D., M.C. Gutiérrez-Castorena, G. M. Cruz-Bello, and C. A. Ortiz Solorio 2013. Physical, chemical, and mineralogical characterization of Vertisols to determine their parent material. *Rev. Interciencia* 7: 488 - 495.
- Steingrobe, B., H. Schmid, R. Gutser, and N. Claassen. 2001. Root production and root mortality of winter wheat grown on sandy and loamy soils in different farming systems. *Biol. Fert. Soils* 33: 331 - 339.
- Van Reeuwijk, L. P. 1993. Procedures for Soil Analysis. Technical paper n° 9. 4th Edition. ISRIC. Wageningen, Netherlands. 119 p.
- van Noordwijk, M. G., H. Brouwer, F. W. Koning, W. Meijboom, and W. Grzebisz. 1994. Production and decay of structural root material of winter wheat and sugar beet in conventional and integrated cropping systems. *Agr. Ecosyst. Environ.* 51: 99 - 113.
- Wang, C., W. Liu, Q. Li, Q. Ma, Q. Lu, W. Feng, L. Xie, Y. Zhu, and T. Guo. 2014. Effects of different irrigation and nitrogen regimes on root growth and its correlation with above-ground plant parts in high-yielding wheat under field conditions. *Field Crop. Res.* 165: 138 - 149.
- Wang, J., X. Wang, M. Xu, G. Feng, W. Zhang, X. Yang, and S. Huang. 2015. Contributions of wheat and maize residues to soil organic carbon under long-term rotation in north China. *Sci. Rep.* 5: 11409.
- Whipps, J. M. 1990. Carbon economy. In: Lynch J.M. (ed) *The rhizosphere*. Wiley, New York, pp: 59 - 97.
- Williams, B. J., and C. A. Ortiz-Solorio. 1981. Middle American folk soil taxonomy. *Ann. Assoc. Amer. Geographers* 71: 335 - 358.
- Wilson, M.G., M.C. Sasal, and O.P. Caviglia, 2013. Critical bulk density for a Mollisol and a Vertisol using least limiting water range: Effect on early wheat growth, *Geoderma* 192: 354 - 361.
- Xu, C., H. Tao, B. Tian, Y. Gao, Y. Ren, and P. Wang. 2016. Limited-irrigation improves water use efficiency and soil reservoir capacity through regulating root and canopy growth of winter wheat. *Field Crop. Res.* 198: 268 - 275.
- Yuan, Z., and H. Y. Chen. 2010. Fine root biomass, production, turnover rates, and nutrient contents in boreal forest ecosystems in relation to species, climate, fertility, and stand age, literature review and meta-analyses. *Crit. Rev. Plant Sci.* 29: 204 - 221.

Zhang, W., K. Liu, J. Wang, X. Shao, M. Xu, J. Li, X. Wang, and D.V. Murphy. 2015. Relative contribution of maize and external manure amendment to soil carbon sequestration in a long-term intensive maize cropping system. *Sci. Rep.* 5: 10791.

Zhang, X., and W. Wang. 2015. The decomposition of fine and coarse roots: their global patterns and controlling factors. *Sci. Rep.* 5: 9440.