

## Manejo agroecológico para la restauración de la calidad del suelo

Ma. Edna Álvarez-Sánchez<sup>§</sup>  
Ranferi Maldonado-Torres  
Cinthia Nájera-Rosas  
David Cristóbal-Acevedo

Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México. CP. 56230. (ranferimt@yahoo.com.mx; cristobalacevdo@yahoo.com.mx).

<sup>§</sup>Autora para correspondencia: edna-alvarez30@yahoo.com.mx.

### Resumen

En el Centro Agroecológico ‘Las Cañadas’ localizado en Huatusco, Veracruz, se implementó el manejo agroecológico de los sistemas de producción desde hace aproximadamente 20 años, como alternativa a los efectos negativos ocasionados por la agricultura convencional; sin embargo, se desconoce el efecto benéfico y la magnitud con la que cada uno de estos sistemas ha contribuido en la restauración de la calidad del suelo desde su implementación. En el presente trabajo se valoró el estado actual de la calidad del suelo de los diferentes sistemas agroecológicos de producción, así como del bosque natural a través de sus propiedades químicas y físicas y diagnosticar el estado de la fertilidad del suelo para la producción de cultivos. Se tomaron muestras compuestas de suelo de los diez sistemas de producción, así como de dos áreas de vegetación restaurada y natural, para determinar sus propiedades químicas y físicas, los insumos locales utilizados en el abonado de los cultivos también fueron caracterizados químicamente. En general, los sistemas ecológicos de producción; a través, de la adición de materia orgánica local, labranza mínima del suelo y adiciones complementarias de insumos han contribuido a la regeneración de la calidad natural del suelo en sus propiedades químicas, pero, el reciclaje de nutrientes a partir de los insumos locales es insuficiente para cubrir las necesidades nutrimentales de los cultivos para una óptima producción. El manejo agroecológico también ha contribuido a que propiedades físicas como microporosidad, humedad aprovechable y agregados estables hayan logrado alcanzar el nivel original en el suelo.

**Palabras clave:** compostas, manejo biointensivo, propiedades físicas, propiedades químicas.

Recibido: abril de 2020

Aceptado: mayo de 2020

## Introducción

En la Región de Huatusco, se cultiva predominantemente café bajo sombra y se practica la ganadería extensiva con doble propósito, actividades que a lo largo del tiempo han desplazado a la vegetación del bosque de niebla, reduciendo el espacio para la flora y fauna endémicas, y de la calidad de los servicios ambientales que proporcionan estos sistemas naturales. Los sistemas diversificados de producción como alternativa al cultivo convencional buscan lograr la resiliencia del sistema; es decir, que se recupere el socioecosistema de las perturbaciones causadas por las prácticas agrícolas convencionales y la cosecha.

En el Centro Agroecológico ‘Las Cañadas’ localizado en Huatusco, Veracruz, se implementó el manejo agroecológico de los sistemas de producción desde hace aproximadamente 25 años, como alternativa a los efectos negativos ocasionados por la agricultura convencional. Esta transformación se sustentó en los principios de los sistemas cerrados, es decir, lo que se extrae del suelo a través de la producción, se devuelve a través del uso de desechos orgánicos producidos en el mismo sistema.

Además, también consideran los pilares agroecológicos (Gliessman, 1998, 2002; Altieri y Nicholls, 2007), esto es, sistemas diversificados de bajos insumos y el manejo orgánico del suelo. Las Cañadas pueden considerarse casi orgánico, conformando un sistema de reciclaje de nutrientes con mínimas pérdidas. La producción de alimentos y satisfacción de necesidades humanas manteniendo la salud de los recursos naturales es el principal objetivo del Centro Agroecológico.

La Cañada, por lo cual, han implementado diversas técnicas de producción: sistemas silvopastoriles para cubrir las necesidades de lácteos, cultivo en callejones y con poca labranza del suelo para la producción de maíz, frijol y tubérculos, así como de leña; método biointensivo (John *et al.*, 2006) para la producción de hortalizas y carbono, bosque comestible para la producción de frutos, semillas, especias y plantas medicinales.

Estas técnicas de cultivo basadas en los principios de recirculación de nutrientes y en la conservación de los recursos naturales (Gliessman, 1998, 2002). Sin embargo, se desconoce el efecto benéfico y la magnitud con la que cada uno de estos sistemas ha contribuido a la restauración de la calidad del suelo a lo largo de 20 años de implementación. El objetivo de este trabajo consistió en valorar el estado actual de la calidad del suelo de los diferentes sistemas agroecológicos de producción, así como del bosque natural; a través, de sus propiedades químicas y físicas y diagnosticar el estado de la fertilidad del suelo para la producción de cultivos.

La importancia de evaluar el impacto de las tecnologías mencionadas no sólo arrojará información sobre la efectividad de las prácticas agrícolas en la calidad del suelo, también permitirá aplicar medidas correctivas para mejorar la productividad de los cultivos. Con el propósito de contribuir al bienestar del sistema ecológico desde el punto de vista de producción de alimentos y para cubrir necesidades humanas de nutrición. También será ejemplo de una nueva forma de producción con baja aplicación de energías externas desechables que puede replicarse en otras regiones de México con fines de restauración y bienestar social.

## Materiales y métodos

### Descripción del sitio

El Centro Agroecológico Las Cañadas se encuentra en el municipio de Huatusco, Veracruz, ubicado en la zona centro del estado sobre la Sierra Madre oriental, en las coordenadas geográficas 19° 09' latitud norte y 96° 58' longitud oeste, a una altura entre los 1 300 y 1 500 msnm. Comprende una superficie de 306 ha, de las cuales 265 ha se destinan para uso forestal, el resto para agropecuario, espacio en el cual se encuentran desarrollados los sistemas agroforestales de estudio.

Los suelos son de origen volcánico clasificados como Andosól mólico + Luvisol crómico, con textura franca, color oscuro, poco pedregosos y ácidos. El relieve es escarpado, accidentado y de laderas (Rey y Bustamante, 1982; Cisneros, 2000). El clima de la región de estudio es semicálido húmedo con temperatura promedio de 19.1 °C, precipitación pluvial media anual de 1 763 mm (Hernández, 2006).

### Descripción de los sistemas ecológicos

La producción de alimentos y satisfacción de necesidades humanas manteniendo la salud de los recursos naturales es el principal objetivo del Centro Agroecológico, por lo cual han implementado diversas técnicas de producción: los sistemas silvopastoriles para cubrir las necesidades de lácteos, cultivo en callejones y con poca labranza del suelo para la producción de maíz, frijol y tubérculos. Así como de leña, método biointensivo (John *et al.*, 2006) para la obtención de hortalizas y carbono; bosque comestible para frutos, semillas, especias y plantas medicinales.

En el Cuadro 1 se describen los sistemas ecológicos de cultivo que se practican en el Centro Agroecológico. Asimismo, se registró el historial de manejo de cada sistema de producción (Cuadro 2).

**Cuadro 1. Descripción de los sistemas ecológicos de cultivo implementados en el Centro Agroecológico La Cañada.**

Núm.	Sistema	Años de manejo	Manejo	Cultivos implementados	Superficie
1	Bosque de niebla		Sin aprovechamiento	Fragmento de reserva ecológica nativa de bosque de niebla	30 ha
2	Bosque Acahual	20	Sin aprovechamiento	Vegetación nativa secundaria	
3	Bosque comestible	10	Cero labranza	Manejo por islas en las cuales se combinan árboles, arbustos y hierbas: frutales (cítricos, plátano, cacao, café, níspero, macadamia, zapote, tubérculos, zarzamora, mora azul, leguminosas como fijadoras de nitrógeno.	7 442 m <sup>2</sup>
4	Parcela maíz-Ixcuabil	10	Paso de yunta	Milpa (maíz variedad jazmín) intercalada con frijol (variedad Tlalchete)	2.5 ha

Núm.	Sistema	Años de manejo	Manejo	Cultivos implementados	Superficie
5	Parcela maíz-tejocote	10	Yunta	Maíz variedad Jazmin, avena ( <i>Avena sativa L.</i> ) como abono verde y barreras vivas de sauco ( <i>Sambucus mexicana L.</i> )	2 233 m <sup>2</sup>
6	Parcela araucaria maíz-frijol	6	Barbecho realizado con tractor, surcado realizado con yunta	Maíz variedad Jazmín y frijol variedad Tlalchete	2.5 ha
7	Cultivo en callejón Bosque de tubérculos	4	Suelo sin laboreo	809 plantas de malanga ( <i>Xanthosoma sagittifolium</i> ) y yuca ( <i>Yuca spp</i> ), asociadas con 60 árboles de timbre ( <i>Acacia angustissima</i> (Mill.) Kuntze) e ilites ( <i>Alnus acuminata</i> Kunth)	1 500 m <sup>2</sup>
8	Huerto biointensivo (cultivos anuales y perennes)	19	Método biointensivo (rotación y asociaciones)	Primavera: pimiento, chícharo, col, gigantón, frijol, soya, lechuga, camote, jitomate, acedera, berenjena; verano: chícharo, pimiento, zacate limón, maíz, frijol, zanahoria, maíz, frijol, lechuga, camote, gigantón, acedera, y tomate verde; invierno: acelga, pimiento, acedera, espinaca, ejote, gigantón, lechuga, zacate limón, chícharo y zanahoria.	548 m <sup>2</sup>
9 y 10	Sistema silvopastoril <sup>2</sup> 1 y 2	8	Laboreo mínimo del suelo	Ilites ( <i>Alnus acuminata</i> Kunth), pasto estrella ( <i>Cynodon plectostachium</i> )	10 ha
11	H. B. Gigantón	19	Método biointensivo	Cultivo de Gigantón ( <i>Thitonia diversifolia</i> ) para la producción de C para la preparación de compostas y adición al suelo en los sistemas.	304 m <sup>2</sup>
12	H. B. King Grass	19	Método biointensivo	Cultivo de King Grass ( <i>Penisetum purpureum</i> ) como fuente de C para la elaboración de composta de excremento humano.	304 m <sup>2</sup>

<sup>2</sup>= el sistema silvopastoril; 1= se caracterizó por buena producción de forraje; 2= con baja producción de forraje.

## Cuadro 2. Abonado realizado en los sistemas ecológicos entre 2010-2012.

Sistema	Aplicaciones							
1 Silvopastoril-1 (kg ha <sup>-1</sup> )	Cal dolomita	Roca fosfórica	B	Profer-G14	FeSO <sub>4</sub>	MnSO <sub>4</sub>	CuSO <sub>4</sub>	ZnSO <sub>4</sub>
	808	500	17	64	42.5	18.2	2.2	30
2 Silvopastoril-2 (kg ha <sup>-1</sup> )	RP	MgSO <sub>4</sub>	B	Profer-G14	MnSO <sub>4</sub>	CuSO <sub>4</sub>	ZnSO <sub>4</sub>	
	500	7.5	17	57.5	11	2.2	32	

Sistema	Aplicaciones							
3 Bosque comestible (g ha <sup>-1</sup> )	CaCO <sub>3</sub> 97.5	Roca fosfórica 305	azufre 9.5	ZnSO <sub>4</sub> 9.9	MnSO <sub>4</sub> 33.9	CuSO <sub>4</sub> 228.4	Boro 3.8	
4 Ixcuabil	Abono fermentado foliar 200 L		Roca fosfórica 23 810 kg ha <sup>-1</sup>					
5 Tejocote (kg ha <sup>-1</sup> )	C- humana 10.1	Cal dolomita 498.9	Roca fosfórica 226.6	azufre 5.7	ZnSO <sub>4</sub> 6	MnSO <sub>4</sub> 24.7	Boro 2.8	Avena fresca 53 000
6 Araucaria y maíz (kg ha <sup>-1</sup> )	C- humana 767	Roca fosfórica 460		Azufre 127	ZnSO <sub>4</sub> 76.5	MnSO <sub>4</sub> 50	CuSO <sub>4</sub> 28.8	
7 Bosque de tubérculos	Orina fermentada 4 662.5 L		Hueso molido 6.4 kg ha <sup>-1</sup>					
8 Huerto biointensivo (kg ha <sup>-1</sup> )	C- cocina 78 000	Hueso molido 60	Roca fosfórica 0.227	MnSO <sub>4</sub> 19.3	Azufre 7.4	Boro 2.6		
11 y 12 H. B. Gigantón y King Grass (kg ha <sup>-1</sup> )	C- cultivos perennes 78 000	Orina humana 200 L	Hueso molido 60	Roca fosfórica 227	MnSO <sub>4</sub> 19.3	Azufre 7.4	Boro 2.6	

Micronutrientes adicionados como: sales férricas= Profer-G14; Fe=Profer11-21; B= Granubor; Mn= Prosulman-C 30% Mn); Zn= Prozinc-C(24% Zn); Fe= Profer11-21; C-= composta humana, de cocina, de cultivos perennes.

En 2015 se colectaron muestras compuestas de suelo (15 a 20 submuestras), de los diez sistemas de producción; así como, de dos áreas de vegetación, acahual y natural, para determinar sus propiedades químicas y físicas. Los suelos fueron analizados en las propiedades químicas: materia orgánica (Walkley y Black), P extractable Olsen; K, Ca y Mg intercambiables en acetato de amonio 1N pH neutro; S extractable con acetato de amonio 0.05 M NH<sub>4</sub>O y determinación por turbidimetría; Zn, Cu, Fe y Mn extraídos con DTPA, B extraído con CaCl<sub>2</sub> 1.0 M, según las metodologías descritas en Álvarez y Marín (2015).

También se determinaron las siguientes propiedades físicas: textura (higrómetro de Bouyoucos), densidad aparente (método de la probeta), porosidad total, macro y microporosidad (Flores, 2010), retención de humedad (método de la membrana); gregados estables al agua (método del tamiz), conductividad hidráulica (método del permeámetro) según las metodologías indicadas por Elrick y Reynolds (1992); USDA (1999). Los insumos locales utilizados en el abonado de los cultivos fueron caracterizados químicamente de acuerdo con las metodologías para análisis de material vegetal (Álvarez y Marín, 2015).

## Resultados y discusión

### Características químicas de los insumos agrícolas utilizados en Las Cañadas

En el Cuadro 3 se muestran las concentraciones de los elementos considerados como esenciales para el desarrollo de las plantas en los insumos agrícolas que se emplean en La Cañada para fertilizar a los cultivos.

**Cuadro 3. Composición nutrimental y pH de los insumos orgánicos utilizados en el Centro Agroecológico.**

Muestra de origen	N	P	K	Mg	Ca	Na	S	Cu	Mn	Zn	Fe	B	pH
	total												
	(%)							(ppm)					
Composta cocina	1.4	0.28	0.8	0.16	1.02	0.04	0.061	35.5	1453.1	210.6	41088	221.3	7
Composta ordeña	2.2	0.57	1.4	0.46	2.04	0.08	0.142	46	980.3	481.8	21738	64.2	8.2
Composta humana	1.9	0.39	1.9	0.28	2.54	0.22	0.072	26.8	395.9	306.1	14463	55.1	8
Composta-cultivos perennes	1.9	0.26	0.7	0.17	1.1	0.03	0.1	33.5	1484.4	100.1	41575	224.3	6.2
Ceniza leña	nd	1.88	6.9	3.17	20.1	0.12	0.064	142.1	1434.6	386.1	4795	553.6	11.4
Hueso quemado	nd	3.47	0.6	0.61	31.1	2.07	0.053	8.3	184.8	219	2078	31	10.2
Follaje Gigantón	3.4	0.21	3.7	0.19	0.8	0	0.058	10.4	32.8	35.8	130	40	nd
King Grass	2.6	0.26	4.2	0.17	0.6	0.02	0.1	10	69.5	35.8	226	0	nd
Orina humana	1.6	0.01	0.6	0	0.05	0.17	0.028	0.9	0.1	0.2	50	3.8	9.3

nd= no determinado.

Como puede apreciarse en el Cuadro 3, las concentraciones de N, P, Ca, Mg y en general de micronutrientes en los insumos agrícolas que se emplean en La Cañada para fertilizar a los cultivos, en general, son muy bajas y se requerirían enormes cantidades de composta para cubrir las necesidades de los cultivos. Además, nutrimentos como Ca y P, no podrían cubrirse puesto que éstos de por sí se encuentran deficitarios en el sistema debido a la génesis del suelo y condiciones de clima.

### Manejo agroecológico y cambios en las propiedades químicas del suelo

En el Cuadro 4 se muestra que con la mayoría de los tipos de manejo agroecológico, no sólo se ha logrado la resiliencia del suelo, también se han sobrepasado los niveles originales de las propiedades químicas suelo indicado en el bosque de niebla. Puede apreciarse que el pH de ser moderadamente ácido en bosque maduro y acahual pasó a ser neutro en el sistema biointensivo, cama de King Grass y cama de gigantón.

**Cuadro 4. Propiedades químicas del suelo en los sistemas de cultivo del Centro Agroecológico.**

Identificación	pH <sup>z</sup>	MO <sup>y</sup>	Ni <sup>x</sup>	P <sup>w</sup>	Ca <sup>v</sup>	K <sup>u</sup>	Mg <sup>s</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>r</sup>	Mn <sup>q</sup>	Fe <sup>p</sup>	Zn <sup>o</sup>	Cu <sup>n</sup>	B <sup>m</sup>	CIC <sup>l</sup>
		(%)	(ppm)										(me 100 g <sup>-1</sup> )	
Bosque acahual	5.6	8.7	23.5	7.3	1206	244	330	33	7.48	84.1	1.92	0.9	0.18	32.8
Interp <sup>10</sup>	ma	m	m	m	m	a	m	a	ad	ad	ad	ba	mb	
Bosque maduro	5.4	7.4	19.6	1.9	1140	194	261	26	8.1	62.8	1.2	0.8	1.01	35.9
Interp	ma	m	m	b	m	m	m	a	ad	ad	ad	b	b	
Bosque comestible	6.04	12.5	15.7	2.7	1322	494	358	34	6.4	48.4	3.3	1.1	0.12	34.3
Interp	ma	a	b	b	m	a	m	a	ad	ad	ad	b	b	
Maíz-ixcuabil	5.63	11.42	15.7	3.2	1092	494	201	29	1.9	60.2	1.4	1.5	1.37	28.6
Interp	ma	a	b	b	m	a	m	a	ad	ad	ad	b	b	
Maíz-Tejocote	5.37	8.7	27.4	4	4728	444	154	93	4.8	70.9	3.1	1.9	0.24	30
Interp	ma	m	m	b	a	a	b	a	ad	ad	ad	b	b	
Maíz-Araucaria	5.69	11.92	27.4	5.1	1154	544	247	39	4.64	49.8	2.3	1.9	0.12	31.2
Interp	ma	a	m	b	me	a	m	a	ad	ad	ad	b	b	
Bosque tubérculos	5.68	8.6	19.6	0.8	1268	514	207	53	3.4	73.4	1.9	1	0.54	32.2
Interp	ma	m	b	b	m	a	m	a	ad	ad	ad	b	b	
Biointensivo	6.61	9.1	27.4	11.3	2196	954	706	19	8.4	65.9	19.7	2.1	0.06	36.4
Interp	n	m	m	m	a	a	a	a	ad	ad	ad	ad	b	
Potrero-ordeña 1	5.66	8.3	27.4	3.5	920	494	258	23	20.8	78.6	2.6	1.7	0.72	26
Interp	ma	m	m	b	b	alt	m	a	ad	ad	ad	b	b	
Potrero-ordeña 2	5.72	10.3	19.6	4	902	424	258	21	68.3	104.6	2.8	1.7	0.12	29.6
Interp	ma	m	b	b	b	a	m	a	ad	ad	ad	b	b	
Cama Kin grass	6.06	10.8	27.4	4.3	1158	344	264	26	2.9	37.2	1.3	0.7	0.54	29.1
Interp	ma	m	m	b	m	a	m	a	ad	ad	ad	b	b	
Cama gigantón	6.38	4.3	23.5	8.4	2024	774	375	24	5.5	38.4	8.7	1.3	0.06	33.3
Interp	ma	b	m	m	a	a	a	a	ade	ad	ad	b	b	

Extracción con CaCl<sub>2</sub> 1.0 M; ma= moderadamente ácido; n= neutro; a= alto; b= bajo; mb= muy bajo; ade= adecuado; m= medio.

Esto debido a la adición continua de composta preparada a partir de residuos de cocina y cenizas de hueso molido que resulta en un pH de 7, la aplicación de roca fosfórica en estos sistemas también genera un efecto alcalino (Chien, 2003) con el paso del tiempo. En ninguno de los sistemas se presentó problemas de sales, misma que varió en el rango de 80.9  $\mu$ S en bosque maduro a 142.3  $\mu$ S en el biointensivo.

El contenido de MO es un indicador que refleja contundentemente los efectos del manejo en los distintos sistemas. El bosque maduro que puede considerarse como el testigo de las condiciones naturales originales en equilibrio (suelo-clima-vegetación), muestra un contenido de materia orgánica de 7.42%, con los distintos manejos a lo largo de aproximadamente 20 años de su instauración, se ha superado sustancialmente este contenido.

Esto no ocurrió en la cama de gigantón, manejo con el cual se ha contribuido a acelerar la oxidación de la materia orgánica nativa; estas camas están destinadas únicamente a la producción de carbono y continuamente se está extrayendo la biomasa aérea para su uso como fuente de carbono en la preparación de compostas, sin haber casi ningún retorno; este sistema puede ser ilustrativo de lo que ocurre en la producción de un monocultivo en un sistema convencional, con las consecuencias de agotar las reservas de materia orgánica aún por debajo del bosque maduro.

Los niveles de nitrógeno inorgánico fueron de medios a bajos. Esto es de esperarse por la precipitación pluvial de la zona que es alta (1763 mm al año), lo que promueve la lixiviación de nitrógeno inorgánico ( $\text{NH}_4+\text{NO}_3$ ) aun cuando se realizan buenas prácticas de manejo (Stopes *et al.*, 2002). En cuanto a la disponibilidad de fósforo, con excepción del bosque acahual, H. biointensivo y cama de gigantón, los niveles de fósforo en el suelo son bajos (<5.5-11 ppm).

Según los valores de hierro disponible en el suelo, que superan por mucho el valor considerado como adecuado (>4.5 ppm), podría ser éste el factor causal de la fijación de P (Jensen *et al.*, 1992). Este factor limitante pudo superarse a un nivel medio de P con el manejo y la adición de roca fosfórica más hueso molido en el sistema biointensivo; en la cama de gigantón puede estar ocurriendo un proceso de disponibilidad gracias a la relación del gigantón (*Thitonia diversifolia*) con las fracciones del fósforo fijado (Eckert, 1987; Jama *et al.*, 2000).

Aquellos nutrientes identificados como deficientes, en parte debido a las condiciones de clima y génesis del suelo, se han introducido esporádicamente y en cantidades insuficientes para cubrir dicha necesidad (Cuadro 2). Por ejemplo, en el sistema maíz-araucaria, (Cuadro 2) con la composta humana sólo se estarían aplicando  $5.8 \text{ kg ha}^{-1}$  de MgO de una necesidad de fertilización del maíz de  $29 \text{ kg ha}^{-1}$  MgO, en cuanto a nitrógeno el déficit sería de  $65 \text{ kg ha}^{-1}$ .

Las recomendaciones de fertilización que se estimaron para cada sistema de producción (no presentadas en este escrito), indican que además de los insumos locales, debe complementarse con productos externos para un mejor rendimiento de los cultivos.

### Manejo agroecológico y cambios en las propiedades físicas del suelo

A diferencia de las propiedades químicas, los distintos manejos agroecológicos han sido menos consistentes en la restauración de las propiedades físicas del suelo al nivel de equilibrio representado por el bosque maduro. Este sistema presentó el mayor porcentaje de porosidad, (66.87%) y si bien, es menor en el resto de los sistemas incluyendo el acahual (Cuadro 5), hay una relación entre el contenido de materia orgánica derivada del manejo y la porosidad total como se muestra en la Figura 1a.

**Cuadro 5. Propiedades físicas del suelo en los sistemas de cultivo de La Cañada.**

Sistema <sup>z</sup>	Porosidad (%)	Porosidad (%)		Constantes de humedad (%)			Da ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Agregados estables (%)	CH ( $\text{cm h}^{-1}$ )
		Microf	Macrof	PMP	CC	HA			
Bosque acahual	60.5	51.09	9.42	38.8	54.2	15.4	0.94	77.22	25.1
Bosque maduro	66.87	45.57	21.3	43.5	57.4	13.9	0.79	70.03	25.7
Bosque comestible	63.18	52.22	10.96	46.5	64.8	18.2	0.81	76.51	13.1



Sistema <sup>z</sup>	Porosidad (%)	Porosidad (%)		Constantes de humedad (%)			Da (g cm <sup>-3</sup> )	Agregados estables (%)	CH (cm h <sup>-1</sup> )
		Microf	Macrof	PMP	CC	HA			
Maíz-ixcuabil	59.05	50.37	8.69	36.7	53.4	16.7	0.94	69.66	12.7
Maíz-araucaria	60.85	55.67	5.18	37.3	61.2	23.9	0.91	73.43	8.4
Maíz-tejocote	58.75	50.99	7.75	38.2	56.1	17.9	0.91	77.17	21
Sistema. Tubérculos	59.76	49.8	9.97	38.3	57.8	19.5	0.86	72.83	8.8
Huerto biointensivo	60.88	47.75	13.13	41.6	54.4	12.9	0.88	82.08	14.5
Silvopastoril-1	58.83	44.46	14.37	37.2	48.9	11.7	0.91	76.25	78.3
Silvopastoril-2	57.8	50.34	7.45	39.6	54.4	14.8	0.93	73.87	19.9
Cama Gigantón	59.53	53.82	5.71	41	59.2	18.2	0.91	76.68	13.6
Cama King Grass	60.18	57.24	2.94	40.7	64.1	23.4	0.89	62.55	22.5

<sup>z</sup>= textura del suelo migajón para todos sistemas; CH= conductividad hidráulica.

En promedio, a partir de aproximadamente 7% de MO, la porosidad se incrementa conforma aumenta el contenido de ésta en los sistemas de producción, producto de la adición continua de abonos orgánicos, lo que confirma que un manejo agroecológico tiende a reducir el efecto negativo por cambio de uso de suelo de bosque a agrícola (Chauveau *et al.*, 2015).

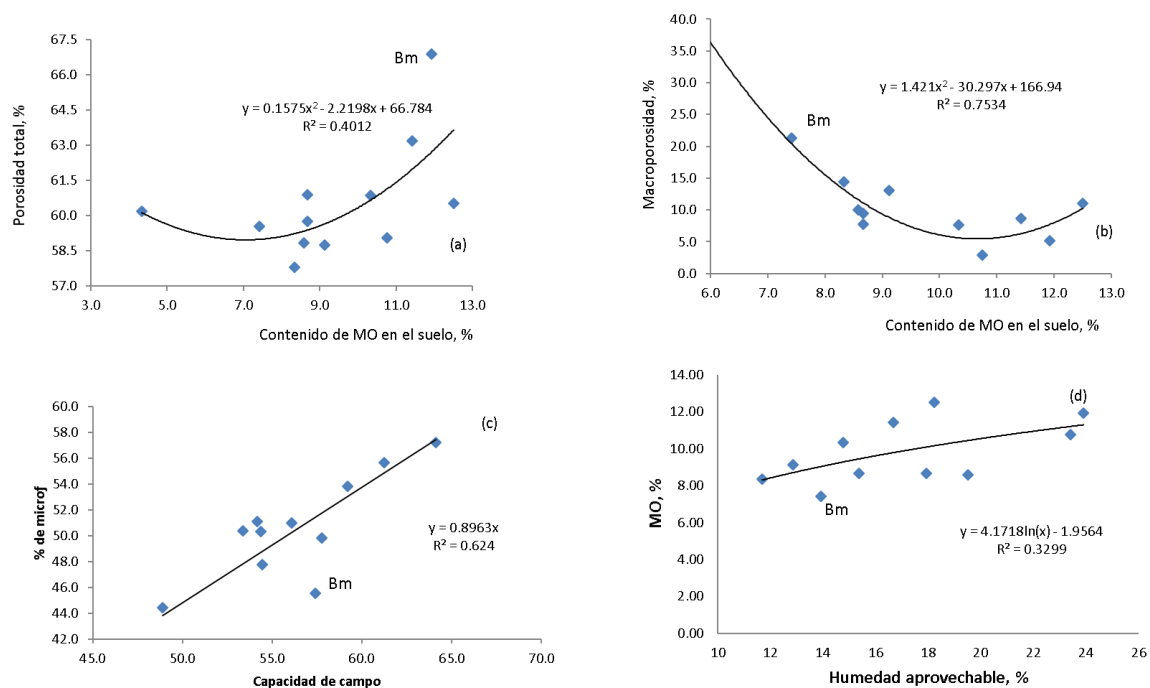
El espacio poroso total, se compone de macroporos (*Macrof*) y microporos (*Microf*). Los primeros son los responsables del drenaje y la aireación del suelo, constituyendo el principal espacio en el que se desarrollan las raíces (Prasad y Power, 1997). El bosque maduro presenta la mayor macroporosidad con un porcentaje de 21.3 y ninguna de las condiciones de manejo ha restablecido esta propiedad (Figura 1b).

Este efecto también se refleja en la conductividad hidráulica, en donde el bosque maduro y el acahual mantienen los valores más altos con 25.7 y 25.1 cm h<sup>-1</sup>, respectivamente. Estudios realizados en sistemas con labranza y sin laboreo, muestran que la macroporosidad es la propiedad más afectada por las condiciones de cultivo y con ello la conducción de agua (Soracco *et al.*, 2012; Dal Ferro *et al.*, 2014).

De acuerdo con Dexter (1987, 2004) el volumen que ocupa una raíz corresponde a una disminución de igual magnitud en el volumen del espacio poroso que rodea a la raíz, el suelo adyacente a ésta es comprimido hasta la mínima porosidad posible, la cual es una constante para un suelo determinado, entre esta zona de mínima porosidad y el cuerpo del suelo, la porosidad aumenta exponencialmente, la distancia desde la raíz a la cual la densidad del suelo es afectada es proporcional al diámetro de ésta.

En consecuencia, puede decirse que el cultivo continuo promueve el crecimiento de las raíces que conlleva a la compresión del suelo (Dexter, 2004) favoreciendo la microporosidad en detrimento de la macroporosidad, como se observa en todos los sistemas de cultivo.

Los microporos (*Microf*) son los responsables de la retención de agua, parte de la cual es disponible para las plantas. Con excepción del H. biointensivo y del silvopastoril, todos los sistemas han contribuido a aumentar la capacidad de retención de agua del suelo en términos de CC y HA (Figura 1c y 1d). Este efecto es atribuido en gran parte a los considerables aportes de materia orgánica.



**Figura 1. Relación entre el contenido de materia orgánica (MO) y a) porosidad total; b) macroporosidad f; d) capacidad de campo y microporosidad f; d) MO y humedad aprovechable en distintos sistemas agroecológicos de producción.**

En forma de composta que también han favorecido la microporosidad del suelo (Prasad y Power, 1997), responsable del agua capilar (Salcedo-Pérez *et al.*, 2007), lo que se confirma por un incremento en la estabilidad de agregados aún por encima del bosque maduro (Cuadro 5). El manejo agroecológico de los sistemas de producción no ha logrado restaurar la densidad aparente a su nivel original ( $0.79 \text{ g cm}^{-3}$ ) del bosque maduro.

Es importante observar que los sistemas de silvopastoreo 1 y 2 presentan densidades similares a los del cultivo de maíz ( $0.91 \text{ g cm}^{-3}$ ), en los cuales el laboreo del suelo es muy reducido de acuerdo con Touchton *et al.* (1989); Dal Ferro *et al.* (2014). A partir, de datos de área basal y peso corporal, es posible estimar que los animales en pastoreo aplican presiones sobre el suelo en el rango entre 150 (novillo de 300 kg) y 350 kPa (oveja adulta), valores notoriamente mayores que los correspondientes a tractores agrícolas, que ejercen presiones del orden de 80 (cubiertas de alta flotación) a 160 kPa (cubiertas radiales simples) (Wood *et al.*, 1991).

En consecuencia, el grado y la extensión de la densificación del suelo es de esperar que sea mayor cuando es causada por animales (Sánchez *et al.*, 1989) que por tractores; sin embargo, el efecto entre sistemas ha resultado similar. El porcentaje de agregados estables fue mayor en el sistema H. biointensivo (82.08%) respecto al bosque maduro (70.03%) y menor en cama King Grass (62.55%).

La MO participa en la formación y estabilidad de los distintos tamaños de agregados, proceso donde el mantenimiento del nivel de agregación depende del modo y la frecuencia con que la MO es incorporada, aunado a esto, la dimensión de los agregados del suelo sería una función del tamaño, la geometría y el modo de deposición de esta (Golchin *et al.*, 1998; Dexter, 2004).

## Conclusiones

En general, los sistemas ecológicos de producción a través de la adición de materia orgánica local, labranza mínima del suelo y adiciones complementarias de insumos han contribuido a la regeneración de la calidad natural del suelo, pero, el reciclaje de nutrientes a partir de los insumos locales es insuficiente para cubrir las necesidades nutrimentales de los cultivos para una óptima producción.

## Literatura citada

- Altieri, M.A. y Nicholls, C. I. 2007. Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: teoría, estrategias y evaluación. *Ecosistemas*. 1(16):3-12.
- Álvarez-Sánchez, M. E. y Marín-Campos, A. 2015. Manual de procedimientos analíticos de suelo y planta. Laboratorio de suelos, Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Chapingo. Estado de México. 82 p.
- Chauveau, M.; Gastó, J.; López, I.; Clunes, J. y Dörner, J. 2015. Efecto del cambio de manejo de una pradera degradada sobre la resiliencia física de un suelo en la precordillera andina de la Araucanía. *Agro sur*. 2(43):19-28.
- Chien, S. H. 2003. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. *In: direct application of phosphate rock and related technology: latest development and practical experiences*. Rajan, S. S. S. and Chien, S. H. (Eds.). Special Publications IFDC-SP-37, IFDC. Alabama, USA. 50-62 pp.
- Cisneros, V. 2000. Ambientes y agricultura en la zona central del estado de Veracruz. Tesis Maestría en Ciencias. FES-Cuautitlán-Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México, DF. 214 p.
- Dal Ferro, N.; Sartori, L.; Simonetti, G.; Berti, A. and Morari, F. 2014. Soil macro-and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth. *Soil and Tillage Research*. 140:55-65.
- USDA. 1999. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. 88 p.
- Dexter, A. R. 2004. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*. 3-4(120):201-214.
- Dexter, A. R. 1987. Compression of soil around roots. *Plant and Soil*. 3(97):401-406.
- Ecker, D J. 1987. Soil testing interpretations: basic cation saturation ratios and sufficiency levels. *In: soil testing: sampling, correlation, calibration and interpretation*. Brown, J. R. (Ed.). Special Publication Number 21. Soil Science Society of America. Inc. Madison Wisconsin, USA. 53-64 pp.
- Elrick, D. E. and Reynolds, W. D. 1992. Infiltration from constant head well permeameters and infiltrometers. *In: Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice*. Soil Science Society of America. Madison Topp, G. C.; Reynolds, W. D. and Green, R. E. (Eds.). WI, USA. 1-24 pp.

- Fageria N. K. 2009. The use of nutrients in crop plants. CRC Press. New York. 430 p.
- Flores, D. L. 2010. Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de Física de Suelos. Departamento de Edafología-Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Ciudad de México, México. 56 p.
- Gliessman, R. S. 2002. Agroecología: procesos ecológicos en Agricultura Sostenible. Turrialba. CATIE. Costa Rica. 341 p.
- Gliessman, S. R.; Engles, E. and Krieger, R. 1998. Agroecology: ecological processes in sustainable agriculture. CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. 339 p.
- Golchin, A.; Baldock, J. and Oades, J. 1998. A model linking organic matter decomposition, chemistry and aggregate dynamics. *In: Soil processes and the carbon cycle.* Lai, R.; Kimble, J.; Follett, R. and Stewart, B. (Eds.). II Series Advances in soil science. Boca Raton, Fl. USA. 245-266 pp.
- Hernández, G. M. 2006. Plan municipal de desarrollo rural sustentable 2006. Consejo Municipal de Desarrollo Rural Sustentable. Huatusco, Veracruz. 30 p.
- Jama, B.; Palm, C. A.; Buresh, R. J.; Niang, A.; Gachengo, C.; Nziguheba, G. and Amadalo, B. 2000. *Tithonia diversifolia* as a green manure for soil fertility improvement in western Kenya: a review. *Agroforestry Systems.* 2(49):201-221.
- Jensen, H. S.; Kristensen, P.; Jeppesen, E. and Skytthe, A. 1992. Iron: phosphorus ratio in surface sediment as an indicator of phosphate release from aerobic sediments in shallow lakes. *Hydrobiology.* 235(1):731-743.
- John, J.; Torres, B. M. y Martínez, V. J. M. 2006. Método de mini-cultivo biointensivo sustentable. Manual de Capacitación. Costa Rica. 32 p.
- Prasad, R. and Power, J. M. F. 1997. Soil fertility management for sustainable agriculture. CRC Press. Boca Raton, Florida. 347 p.
- Rey, C. J. A. y Bustamante, B. I. D. 1982. Inventario de áreas erosionadas, rangos de pendiente y unidades de suelo del estado de Veracruz. Dirección General de Conservación de Suelo y Agua, SARH. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Chapingo Estado de México. 139 p.
- Salcedo-Pérez. E.; Galvis-Spinola, A.; Zamora-Natera, F.; Hernández-Mendoza, T. M.; Bugarin-Montoya, R.; Rodríguez-Macías, R. y Carrillo-González, R. 2007. La humedad aprovechable y su relación con la materia orgánica y superficie específica del suelo. *Terra Latinoam.* 4(25):419-425.
- Sánchez, P.; Castilla, C. and Alegre, J. 1989. Grazing pressure effects on the pasture degradation process. Document No. 42511 CIAT. Tropsoils Management Entity, North Carolina State University. Raleigh, NC, USA. 182-187 pp.
- Soracco, C. G.; Lozano, L. A.; Balbuena, R.; Ressia, J. M. y Filgueira, R. R. 2012. Contribución de la macroporosidad al flujo de agua de un suelo bajo diferentes sistemas de labranza. *Rev. Bras. Ciênc. Solo.* 4(36):1149-1156.
- Stopes, C.; Lord, E. I.; Philipps, L. and Woodward, L. 2002. Nitrate leaching from organic farms and conventional farms following best practice. *Soil Use and Management.* 1(18):256-263.
- Touchton, J. T.; Reeves, D. W. and Delaney, D. P. 1989. Tillage systems for summer crops following winter grazing. *In: Proc. 1989 Southern Conservation Tillage Conference.* Tallahassee, Florida. USA. 72-75 pp.
- Wood, R. K.; Morgan, M. T.; Holmes, R. G.; Brodbeck, K. N.; Carpenter, T. G. and Reeder, R. C. 1991. Soil physical properties as affected by traffic: single, dual, and flotation tires. *Transactions of the ASAE.* 34(6):2363-2369.