

EFFECTO DEL MANEJO EN LA AGREGACIÓN DEL SUELO EN UN ECOSISTEMA TROPICAL SECO

Effect of Management on Soil Aggregation in a Tropical Dry Ecosystem

S. Martínez-Trinidad^{1†}, H. Cotler², J. D. Etchevers-Barra¹,
Víctor M. Ordaz-Chaparro¹ y F. de León-González³

RESUMEN

Los ecosistemas constituidos por bosques tropicales secos caducifolios (BTS) presentan un intenso cambio de uso, ya que principalmente se convierten a agroecosistemas con pastizales y cultivos. Los efectos de tales cambios en el suelo deben evaluarse en forma integral, en términos de su funcionamiento, aptitud y vulnerabilidad para asegurar que la calidad del recurso no sufra deterioros. Para ello, se requiere contar con indicadores edáficos, en particular, del tipo que muestre los cambios tempranos que experimenta el sistema recurso suelo. En el presente trabajo se evaluó la agregación del suelo como un indicador de calidad que pudiese experimentar el suelo de los BTS debido a la intervención antrópica. El estudio se realizó en una unidad morfo-edafológica representativa del ecosistema BTS (ladera sobre granito con Regosol éutrico) en la costa del estado de Jalisco, México, en la cuál se identificaron tres usos de suelo: BTS conservado, BTS pastoreado y pastizal cultivado. De manera general, el aumento de la intensidad de manejo del suelo originó las modificaciones siguientes: incremento en el valor de la densidad aparente, disminución en la porosidad total y en la porosidad interna de macroagregados, disminución en el valor de pH, carbono orgánico y suma de bases intercambiables del suelo. Por otro lado, el BTS pastoreado y el pastizal cultivado mostraron mayor cantidad de macroagregados, principalmente de aquellos > 4.76 mm y una mejor resistencia a la erosión del suelo, mientras que el BTS conservado presentó mayor cantidad

de agregados de 4.76 a 0.50 mm, lo cual repercute en una mejor estructuración del suelo. Tal distribución de agregados conduce a una mejor condición edáfica para el desarrollo de los bosques del trópico seco. Las propiedades edáficas que, en general, se relacionaron con los agregados fueron arcilla, carbono orgánico, calcio y volumen radical. Este estudio aporta datos importantes que pueden promover estrategias apropiadas de conservación del suelo.

Palabras clave: *calidad de suelo, degradación de suelo, geomorfología de suelo.*

SUMMARY

Tropical dry forest (TDF) ecosystems have undergone intense change in its land-use, mainly to agro-ecosystems with pasture and cropland. The effects of land-use changes should be integrally evaluated based on functionality, aptitude, and vulnerability in order to ensure that the resource quality will not be deteriorated; therefore, edaphic indicators that show early changes in soil conditions are required. The objective of this investigation was to evaluate soil aggregation as a quality indicator, in order to detect land-use changes as a result of anthropogenic degradation in a TDF ecosystem. The research was done in a representative morpho-edaphology unit of the TDF ecosystem (hill slope on granite with eutric Regosol) on the coast of the state of Jalisco, Mexico. The unit mainly presents three land uses: conserved TDF, TDF with cattle, and pasture. An increase in the intensity of land-use causes an increase in bulk density, decrease in total porosity, decrease in the internal porosity of macro aggregates, decrease in pH, organic carbon, and total exchangeable bases of the soil. TDF with cattle and pasture show a number of macro aggregates larger than 4.76 mm, and better resistance to soil erosion. Conserved TDF had more aggregates of 4.76 to 0.50 mm, resulting in better soil structure and improved edaphic conditions for tropical dry forests. The edaphic properties that, in general, are related to aggregates were clay, organic

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México.

[†] Autor responsable (sergiomtzt@colpos.mx)

² Instituto Nacional de Ecología. Avenida Periférico Sur 5000, Col. Insurgentes-Cuicuilco, 04530 México D. F.

³ Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, Departamento de Producción Agrícola y Animal. Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, 04960 México, D. F.

carbon, calcium, and root volume. This study presents important data that can suggest appropriate strategies for soil conservation.

Index words: soil quality, land degradation, soil geomorphology.

INTRODUCCIÓN

El ecosistema tropical seco (ETS) que se ubica en la costa del estado de Jalisco, México, ha sido motivo de una serie de estudios relacionados con la estructura y el funcionamiento del sistema desarrollado por la Fundación Ecológica de Cuixmala, A. C., la Universidad Nacional Autónoma de México, e investigadores de universidades del extranjero (Martínez-Yrizar *et al.*, 2000; Noguera *et al.*, 2002). Sin embargo, son pocos los estudios que se refieren a la caracterización y evaluación de las funciones del suelo dentro de este ETS.

En general, los ETS presentan un persistente disturbio antropogénico que origina el desequilibrio en el uso de los recursos naturales y las modificaciones del ecosistema. Uno de los problemas del ETS en México es la pérdida de aproximadamente 36 200 km² de BTS, ocurrida entre el período 1976 y 2000, de los cuales 23% corresponde a cambios de uso del suelo, para aumentar la superficie destinada a la agricultura y la ganadería (Trejo y Dirzo, 2000; Velázquez *et al.*, 2002). En este cambio de uso de suelo destaca una clara tendencia a la conversión de pastos. Este cambio de cobertura vegetal repercuten en la disminución de la calidad del suelo.

La tendencia actual es evaluar los cambios que ocurren en el edafosistema con la ayuda de indicadores de calidad que facilitan la evaluación integral del recurso en términos de su funcionamiento, aptitud y vulnerabilidad. La generación y el uso de indicadores para evaluar la calidad de estos sistemas se consideran básicos para realizar un manejo sostenible del recurso suelo. Los indicadores seleccionados deben ser relativamente sensibles a los cambios tempranos que ocurren en el suelo como consecuencia del cambio de uso de la tierra y de los cambios climáticos, para permitir el monitoreo de la calidad del suelo en el tiempo e identificar tendencias adversas.

La agregación del suelo se considera como un indicador que proporciona información acerca de la capacidad de este medio para funcionar en su calidad de componente básico del ecosistema. El suelo, como cuerpo poroso, interviene en el transporte de líquidos, gases,

calor; además, influye en procesos físicos, como la infiltración, aireación y erosión (Topp *et al.*, 1996). La agregación del suelo integra propiedades edafológicas (físicas, químicas y biológicas) que son fáciles de medir, sensibles a variaciones del clima y manejo; detecta cambios en el suelo como resultado de la degradación antropogénica (Seybold y Herrick, 2001). Por todo esto, se le considera una excelente herramienta para evaluar la calidad del suelo (Cammeraat e Imeson, 1998).

Existen pocos estudios referentes a la agregación del suelo en los ETS en México, por lo que se considera que establecer el comportamiento de la agregación del suelo en situaciones de manejo típicas del ETS sería una contribución importante para esos ecosistemas. La agregación está relacionada con la capacidad de amortiguamiento del suelo y con los procesos de erosión (Cotler y Ortega-Larrocea, 2006).

El estudio de la variabilidad espacial de la agregación del suelo se debe hacer al interior de unidades integrales que involucren patrones de clima, suelo, vegetación y geomorfología homogénea (Boix-Fayos *et al.*, 2001). Dado que las condiciones litológicas y de relieve influyen en numerosas características edáficas y microclimáticas determinantes en la agregación del suelo (textura, humedad, exposición, inclinación), es necesario para el estudio de esta variable considerar unidades relativamente homogéneas, en términos morfo-edafológicos.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto del manejo de un suelo en su proceso de agregación y las propiedades edáficas de una unidad morfo-edafológica representativa del ETS ubicado en la costa de Jalisco, donde se han identificado tres tipos de uso de suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se localizó en la cuenca hidrológica del río Cuixmala, con extensión territorial de 1089 km², localizada al suroeste del estado de Jalisco, México. La ubicación geográfica de la cuenca es desde 19° 29' hasta 19° 34' N y 104° 58' hasta 105° 04' O. La selección de los sitios de estudio al interior de la cuenca se hizo mediante cartografía morfo-edafológica (Cotler *et al.*, 2002), debido a que cada unidad presenta procesos de morfogénesis y pedogénesis homogéneos. La unidad morfo-edafológica más representativa de la zona de estudio fue laderas sobre granito con Regosol éutrico, como suelo representativo, ya que ocupa una superficie de 852.14 km² que equivalen al 78.23% del área total.

Para estudiar el efecto de cambio de uso del suelo en esta unidad morfo-edafológica se seleccionaron tres usos de suelo característicos: bosque tropical caducifolio (BTC) conservado, BTC pastoreado y pastizal cultivado. Las características generales de los sitios muestreados se pueden observar en el Cuadro 1.

En cada unidad morfo-edafológica se obtuvieron seis muestras de suelo en época de lluvias (octubre de 2004) y seis muestras en época de secas (mayo de 2005). Tres de estas muestras se obtuvieron en la posición alta de la ladera y tres muestras en la posición baja de ésta; la profundidad de muestreo fue el estrato de 0 a 8 cm, correspondiente a la capa superficial del suelo. Se tomaron muestras no alteradas y alteradas. La agregación del suelo se evaluó en muestras no alteradas y las variables edáficas en las muestras alteradas.

La humedad residual de las muestras se cuantificó gravimétricamente. La densidad real se determinó utilizando el método del picnómetro y la densidad aparente mediante el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986). La porosidad total (Pt) se calculó a partir de los datos de densidad aparente (Da) y densidad real (Dr):

$$Pt(\%) = [1 - (Da / Dr)](100)$$

El contenido de arcilla se determinó por el método de la pipeta (FAO, 1984). El pH se midió en agua (relación 1:2). El carbono orgánico se determinó por el método de combustión seca (Etchevers, 1988). Las bases

intercambiables se evaluaron con el método acetato de amonio 1N pH 7.0 (Sumner y Miller, 1996). La biomasa de raíces se cuantificó con la metodología empleada en Castellanos *et al.* (2001) que emplea el principio del volumen desplazado.

La porosidad interna de macroagregados se determinó por el método propuesto por Roger-Estrade *et al.* (2004). Los macroagregados seleccionados para esta prueba fueron aproximadamente de 5 mm; éstos se partieron a la mitad y se observaron en un microscopio equipado con el objetivo 2x. Para la cuantificación de la porosidad interna se aplicó la técnica de análisis de imágenes con el programa de cómputo IMAGE-PRO-PLUS, Versión 5.0. Mediante la imagen captada y el uso del programa con la función count/size se cuantificó la porosidad interna de macroagregados (León-González *et al.*, 2006).

La distribución del tamaño de agregados se determinó mediante el método de tamizado en seco (Savinov, 1936) y tamizado en húmedo (Yoder, modificado por Kemper y Rosenau, 1986). Con los resultados del tamizado en seco se calculó el coeficiente de estructuración del suelo (Kaurichev, 1984). El tamizado en húmedo se utilizó para establecer la estabilidad de agregados y el parámetro denominado diámetro medio ponderado. Los macro y microagregados se obtuvieron a partir del tamizado en húmedo, la suma de los agregados > 1 mm se consideraron macroagregados, mientras que la suma de los agregados < 1 mm se denominaron microagregados (Cotler y Ortega-Larrocea, 2006).

Cuadro 1. Características generales de los bosques tropicales caducifolios (BTC) conservado, pastoreado y los pastizales cultivados en la cuenca hidrológica del río Cuixmala, Jalisco, México.

Características	Sistemas de manejo		
	Ladera sobre granito con BTC conservado	Ladera sobre granito con BTC pastoreado	Ladera sobre granito con pastizal cultivado
Coordenadas UTM	19°29'28'' N 104°56'14'' O	19°38'55'' N 104°49'35'' O	19°36'2.4'' N 104°52'29.2'' O
Exposición	168° S-SE	220° S-SE	236° S-SO
Geoforma	Ladera de lomerío	Ladera de lomerío	Ladera de lomerío
Material parental	Granito	Granito	Granito
Pendiente promedio	12°	12°	13°
Vegetación natural	Selva baja caducifolia	Selva baja caducifolia, acahuals	Pastos introducidos (<i>Andropogon</i> sp.)
Antecedentes	Sin disturbio antropogénico	Actividad de ganado desde hace 10 años, evidencias de excrementos, pisadas de ganado y presencia de ramoneo	Cultivado desde hace 10 años, práctica de quema cada dos años, pastoreo por el ganado

Los resultados se sometieron a un análisis de varianza y una comparación de medias mediante el criterio de diferencia mínima significativa con Tukey ($P \leq 0.05$). Por último, se realizaron correlaciones entre las propiedades edafológicas y la estabilidad de agregados. Para el análisis estadístico se utilizó el programa SAS, Versión 8 (Cody y Smith, 1991).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades Edáficas

Los valores medios y algunos datos estadísticos asociados de las propiedades físicas, químicas y biológicas determinados en las muestras de suelo del BTC conservado y los dos sistemas de manejo se presentan en el Cuadro 2. El cambio de uso del suelo de BTC conservado a pastizal cultivado incrementó la densidad aparente y causó una disminución en la porosidad total, porosidad interna de macroagregados, carbono orgánico, pH y suma de bases intercambiables. La humedad residual del BTC conservado en el momento del muestreo resultó ser menor que la del BTC pastoreado, pero mayor que la del pastizal cultivado. El BTC conservado y el BTC pastoreado comparten semejanza en lo referente a altos contenidos de arcilla y porosidad total. Sin embargo, la porosidad interna de macroagregados del pastizal cultivado fue menor que la del BTC conservado, pero

mayor que la del BTC pastoreado (Figura 1). El BTC pastoreado y el pastizal cultivado presentaron los pH más bajos y de suma de bases intercambiables, mientras que el volumen de raíces húmedas fue mayor que en BTC conservado. El BTC pastoreado presentó valores intermedios (entre el BTC conservado y el pastizal cultivado) de densidad aparente y de carbono orgánico.

El efecto que tiene el manejo sobre los atributos del suelo se observó en la humedad residual de las muestras en el momento en que se obtuvieron, así como en la densidad aparente, porosidad total, porosidad interna de macroagregados, carbono orgánico, pH, suma de bases intercambiables y en el volumen de raíces húmedas (Cuadro 3).

La calidad de suelo en el BTC conservado fue mejor que en el pastizal cultivado, porque presentó mayor porosidad total (característica que favorece la aireación), mayor porcentaje de carbono orgánico, el cual contribuye a la retención de nutrientes, y mejores niveles de pH y de suma de bases intercambiables que benefician el aspecto nutrimental para el desarrollo de la vegetación del trópico seco. En cambio, el pastizal cultivado, que está sometido a explotación ganadera extensiva, mostró un deterioro de las propiedades edáficas antes mencionadas, una disminución de humedad residual en el momento del muestreo y un incremento de la densidad aparente, todo lo cual determina que la calidad del suelo en ese manejo fuese menor a la condición del BTC conservado.

Cuadro 2. Medias de las propiedades edafológicas del bosque tropical caducifolio (BTC) conservado, pastoreado y pastizal cultivado en la cuenca hidrológica del río Cuixmala, Jalisco, México.

Propiedades edáficas	DMS [†]	Sistema de manejo					
		BTC conservado [‡]		BTC pastoreado		Pastizal cultivado	
		M	DE	M	DE	M	DE
Humedad (%)	1.53	5.70 b [§]	5.93	8.47 a	8.58	3.89 c	4.56
Densidad aparente (Mg m ⁻³)	0.06	0.94 c	0.10	1.06 b	0.13	1.23 a	0.12
Porosidad total (%)	4.97	61.0 a	4.11	56.17 a	5.57	51.05 b	5.12
Porosidad interna de macroagregados (%)	1.74	21.6 a	5.30	9.9 c	3.20	13.2 b	3.50
Arcilla (%)	2.66	20.0 a	5.49	18.3 a	1.30	6.83 b	2.98
pH (1:2 H ₂ O)	0.45	7.08 a	0.38	5.93 b	0.60	5.79 b	0.37
Carbono orgánico (%)	0.94	4.91 a	1.38	3.12 b	0.65	2.11 c	0.60
Calcio (cmol _c kg ⁻¹)	4.64	21.04 a	7.15	7.08 b	3.36	4.52 b	1.40
Magnesio (cmol _c kg ⁻¹)	0.77	4.80 a	0.94	3.39 b	0.93	1.19 c	0.20
Potasio (cmol _c kg ⁻¹)	0.51	0.62 a	0.53	0.81 a	0.48	0.52 a	0.54
Sodio (cmol _c kg ⁻¹)	0.08	0.08 a	0.07	0.10 a	0.11	0.05 a	0.05
Bases intercambiables (cmol _c kg ⁻¹)	5.31	26.55 a	7.95	11.40 b	4.24	6.28 b	1.78
Raíces húmedas (cm ³)	1.49	1.33 b	1.38	2.90 a	3.51	3.05 a	3.09
Raíces secas (cm ³)	0.92	0.66 a	0.47	1.02 a	1.05	1.13 a	1.11

[†] DMS = diferencia mínima significativa; [‡] M = media; DE = desviación estándar; [§] Letras diferentes en la misma hilera indican que las medias presentan diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

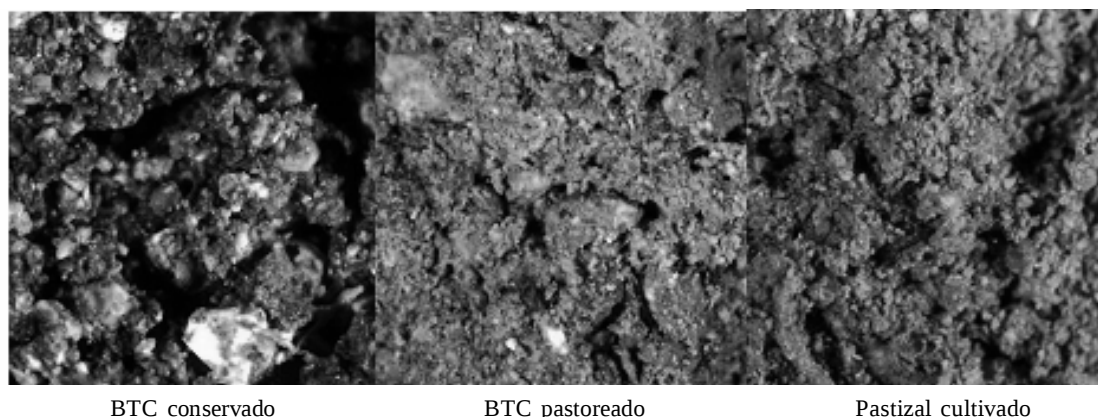


Figura 1. Porosidades internas de macroagregados del bosque tropical caducifolio (BTC) conservado, pastoreado y pastizal cultivado en la cuenca hidrológica del río Cuixmala, Jalisco, México.

Esto coincide con los resultados obtenidos por García-Oliva y Maass (1998) quienes también encontraron una mayor densidad aparente y una disminución de materia orgánica y de nutrientes en el pastizal cultivado. Como el BTC pastoreado presentó un manejo de suelo que es una transición entre el BTC conservado y el pastizal cultivado, los valores de densidad aparente y de carbono orgánico en este sistema resultaron intermedios. Según Roger-Estrade *et al.* (2004), la porosidad interna de macroagregados (PIMa) es un indicador físico de la calidad del suelo. La mayor PIMa se encontró en el BTC conservado, mientras que en BTC pastoreado y en pastizal cultivado fue menor debido, posiblemente, al excesivo pisoteo del ganado. Los macroagregados del BTC pastoreado y pastizal cultivado no se consideraron favorables para que el suelo desarrolle sus funciones en un nivel adecuado, porque tienen escasa porosidad interna.

Estabilidad de Agregados

La estabilidad de agregados de las diferentes fracciones de tamaño de agregados se presenta en la Figura 2. La estabilidad de agregados no fue la misma en todas las clases. La proporción relativa de agregados < 0.25 mm fue alta en los tres usos de suelo, pero

principalmente en BTC conservado. La estabilidad de agregados de tamaño 0.50 a 4.76 mm resultó más alta en el BTC conservado, pero los agregados > 4.76 mm fueron mayores en BTC pastoreado y en pastizal cultivado. En general, el BTC conservado y el pastoreado no tuvieron semejanzas en las fracciones de agregados, mientras que el BTC pastoreado y el pastizal cultivado compartieron semejanza en la mayoría de las clases de agregados.

Como consecuencia de lo anterior, en el BTC pastoreado y en el pastizal cultivado se obtuvo la mayor proporción de macroagregados, mientras que en BTC conservado prevaleció una mayor proporción de microagregados (Figura 3).

Con el propósito de conocer la relación de los agregados con las propiedades edáficas, se estableció una matriz de correlaciones entre los tamaños de agregados > 1 mm y < 1 mm (generadas por el estudio de estabilidad de agregados) y las propiedades edáficas (Cuadro 3). Los macroagregados del BTC conservado tuvieron una alta y positiva relación con el volumen de raíces secas y el volumen de raíces húmedas, mientras que la relación con el calcio, magnesio y potasio fue más baja y negativa, pero alta para arcilla y sodio. En el caso de los microagregados, la relación con el calcio, potasio y sodio fue alta y positiva, obteniéndose una

Cuadro 3. Efecto de manejo del suelo en las propiedades edáficas de la cuenca hidrológica del río Cuixmala, Jalisco, México.

	Propiedades edáficas (Pr > F)						
	H	Da	PT	PIMa	Corg	pH	Σ Bi
$\alpha \leq 0.05$	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
							Vrh
							0.01

[†] H = humedad residual; Da = densidad aparente; PT = porosidad total; PIMa = porosidad interna de macroagregados; Corg = carbono orgánico; Σ Bi = suma de bases intercambiables; Vrh = volumen de raíces húmedas.

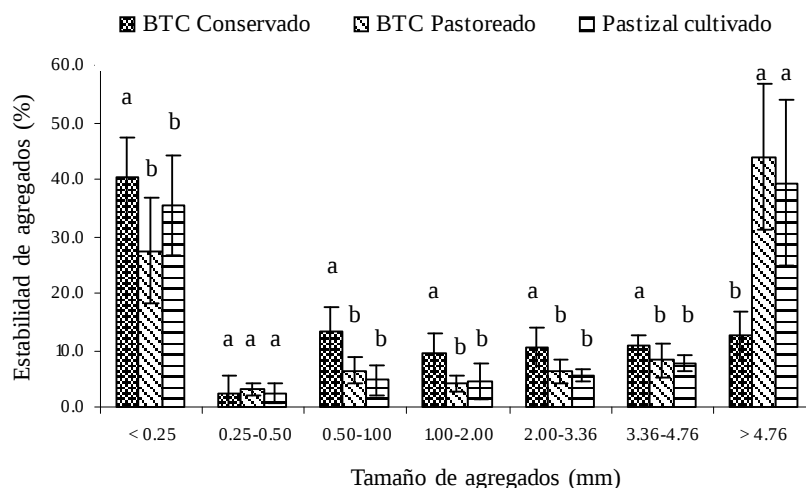


Figura 2. Medias de la estabilidad de agregados, realizadas en las muestras de suelo del bosque tropical caducifolio (BTC) conservado, pastoreado y pastizal cultivado en la cuenca hidrológica del río Cuixmala, Jalisco, México. Barras verticales corresponden al error estándar de la media. Letras diferentes en la misma clase de tamaño de agregados indican que las medias presentan diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

relación más baja con la arcilla. Sin embargo, para el carbono orgánico fue alta y negativa.

Los macroagregados del BTC pastoreado presentaron una relación baja y positiva con el carbono orgánico y magnesio, pero la relación de los microagregados con sodio fue alta y positiva, mientras que para magnesio la relación fue alta y negativa. En el pastizal cultivado, los macroagregados tuvieron relación baja y positiva con el volumen de raíces húmedas, mientras que con la arcilla fue baja y negativa.

Para el caso de los microagregados se obtuvo una relación alta y positiva para el volumen de raíces secas y raíces húmedas, pero para el caso del sodio fue baja.

El efecto que ejerce el manejo del suelo en los distintos tamaños de agregados se reflejó en la prueba de estabilidad de agregados en húmedo, como se puede observar en el Cuadro 5.

En el BTC conservado se encontró la mayor proporción de agregados de tamaño 0.50-4.76 mm cuando se determinó la estabilidad de agregados en

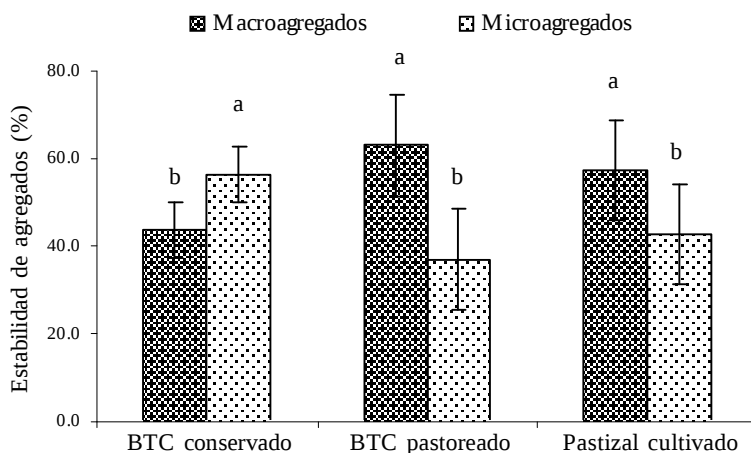


Figura 3. Medias de macro (> 1 mm) y micro (< 1 mm) agregados resultantes de la prueba de estabilidad de agregados practicada en muestras de suelo, tomadas en los sitios del bosque tropical caducifolio (BTC) conservado, pastoreado y pastizal cultivado en la cuenca hidrológica del río Cuixmala, Jalisco, México. Barras verticales corresponden al error estándar de la media. Letras diferentes en la misma clase de agregados indican que las medias presentan diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

Cuadro 4. Patrón de correlación de los macro (> 1 mm) y micro (< 1 mm) agregados con las propiedades edáficas del bosque tropical caducifolio (BTC) conservado, pastoreado y pastizal cultivado en la cuenca hidrológica del río Cuixmala, Jalisco, México.

	Propiedades edáficas							
	Arcilla	Corg [†]	Calcio	Magnesio	Potasio	Sodio	Vrs [‡]	Vrh [§]
BTC conservado								
Macroagregados	-0.68		-0.57	-0.61	-0.59	-0.73	0.7	0.69
Microagregados	0.58	-0.76	0.67		0.94	0.81		
BTC pastoreado								
Macroagregados		0.6		0.57				
Microagregados				-0.68		0.72		
Pastizal cultivado								
Macroagregados	-0.56							0.56
Microagregados						0.61	0.81	0.86

Correlaciones significativas ($P \leq 0.05$); [†] Corg = carbono orgánico; [‡]Vrs = volumen de raíces secas; [§]Vrh = volumen de raíces húmedas.

Cuadro 5. Efecto de manejo del suelo en los tamaños de agregados de la prueba de estabilidad en húmedo de la cuenca hidrológica del río Cuixmala, Jalisco, México.

	Tamaño de agregados (Pr > F)						Macro [†] (> 1 mm)	Micro [‡] (< 1 mm)
	< 0.25	0.50-1.00	1.00-2.00	2.00-3.36	3.36-4.76	> 4.76		
$\alpha \leq 0.05$	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01

La clase de agregados 0.25-0.50 no fue significativa; [†] Macro = macroagregados; [‡] Micro = microagregados.

húmedo. La proporción de éstos presentó una relación positiva con el volumen de raíces secas y raíces húmedas. Con base en lo anterior se infiere que la participación del volumen radical es importante para la formación de agregados en general. El BTC pastoreado y el pastizal cultivado tuvieron mayor proporción de macroagregados principalmente de tamaño > 4.76 mm. Esta variable de respuesta se relacionó positivamente con el carbono orgánico en el primer sistema de manejo. El carbono orgánico es una fuente importante en la formación de macroagregados en el suelo del ETS (García-Oliva *et al.*, 1999). En el caso del pastizal cultivado sólo se encontró que había una relación positiva con el volumen de raíces húmedas; las raíces asociadas a los macroagregados contribuyen a mantener juntas las partículas del suelo. El BTC conservado tuvo mayor cantidad de microagregados de tamaño < 0.25 mm; éstos mostraron una relación positiva con arcilla y calcio, pero negativa con carbono orgánico, lo cual indica que la arcilla y el calcio son posiblemente los principales agentes de la agregación en ese nivel de organización especial. En algunos estudios, la relación de la arcilla con la agregación del suelo es ambivalente, lo cual no permite establecer una relación clara con la formación de agregados (descritos en la revisión por Le Bissonnais,

1995). La alta porosidad interna de macroagregados en BTC conservado, aunado a un humedecimiento rápido del suelo, puede ocasionar una fuerza suficiente que provoca la destrucción de los macroagregados repercutiendo en el aumento de microagregados.

Indicadores de Agregación

En el Cuadro 6 se observan valores medios de indicadores de agregación y algunos datos estadísticos asociados del diámetro medio ponderado y del estado estructural del suelo para el BTC conservado y los otros dos sistemas de manejo. En el suelo del BTC pastoreado y del pastizal cultivado, la estabilidad del suelo, de acuerdo con la información del DMP, se clasificó como muy estable al efecto del agua, mientras que el BTC conservado se clasificó como estable (clasificación propuesta por Le Bissonnais, 1996). El estado estructural del BTC conservado se catalogó como excelente, pero en los sistemas de manejo BTC pastoreado y pastizal cultivado sólo fue satisfactorio (clasificación propuesta por Kaurichev, 1984).

Existen pocos estudios en ETS en los cuales se emplee la agregación como indicador de la erosión del suelo (Chappell *et al.*, 1999; Cotler y Ortega-Larrocea,

Cuadro 6. Medias de los indicadores de agregación del suelo del bosque tropical caducifolio (BTC) conservado, pastoreado y pastizal cultivado en la cuenca hidrológica del río Cuixmala, Jalisco, México.

Indicadores	DMS [†]	Sistemas de manejo					
		BTC conservado [‡]		BTC pastoreado		Pastizal cultivado	
		M	DE	M	DE	M	DE
Diámetro medio ponderado	0.64	1.84 b [§]	0.23	3.47 a	0.74	3.13 a	0.81
Estado estructural del suelo (%)	8.31	82.1 a	4.54	40.3 c	12.1	59.4 b	6.15

[†] DMS = diferencia mínima significativa; [‡] M = media; DE = desviación estándar; [§] Letras diferentes en la misma hilera indica que las medias presentan diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

2006). Relacionando el indicador de estabilidad del diámetro medio ponderado (DMP) con el proceso de erosión hídrica, se puede concluir que el BTC pastoreado y el pastizal cultivado presentaron mayor resistencia al efecto del agua. Sin embargo, el BTC conservado resultó con el mejor estado estructural del suelo (EES), lo cual favorece al transporte de líquidos, gases y calor, pero, además, proporciona excelentes condiciones para el desarrollo de la vegetación del trópico seco.

CONCLUSIONES

- El efecto de manejo del suelo de un ecosistema tropical seco, dentro de una misma unidad morfo-edafológica, ocasionó cambios en varias propiedades edáficas como: humedad residual, densidad aparente, porosidad total, porosidad interna de macroagregados, pH, carbono orgánico, suma de bases y volumen radical, que están relacionados con la calidad del suelo.
- En cuanto a la estabilidad de agregados, el manejo del suelo modificó la proporción relativa en la mayoría de los tamaños de agregados. Aunque los sistemas de manejo presentaron mayor estabilidad de agregados, éstos son menos aptos para el desarrollo de las funciones del suelo, debido a su escasa estructuración y porosidad interna. La relación de los tamaños de agregados con las propiedades edáficas fue diferente para cada uso de suelo.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. J. Manuel Maass Moreno por el apoyo económico para la etapa de campo y los análisis de laboratorio, proyecto “Manejo del agua en la cuenca del Río Cuixmala: bases ecológicas y sociales para un manejo integrado de cuencas” clave IN222703-PAPIIT-DGAPA. Así también, al Dr. Alejandro Velázquez Montes por el apoyo económico para la fase de escritura de la investigación, proyecto “Eco-regionalización como base para la evaluación de

la aptitud del territorio” clave SEMARNAT-2002-C01-00133. Al Biol. L. Raúl Ahedo Hernández por la gestión de los trámites administrativos y el apoyo logístico para llevar a cabo la etapa de campo. Al Ing. Salvador Araiza y Abel Verduzco por el apoyo brindado en la etapa de muestreo.

LITERATURA CITADA

- Blake, G. R. and K. H. Hartge. 1986. Bulk density. pp. 363-365. In: A. Klute (ed.). Methods of soil analysis. Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.
- Boix-Fayos, C., A. Calvo-Cases, A. C. Imeson, and M. D. Soriano-Soto. 2001. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. *Catena* 44: 47-67.
- Cammeraat, L. H. and A. C. Imeson. 1998. Deriving indicators of soil degradation from soil aggregation studies in Southeastern Spain and Southern France. *Geomorphology* 23: 307-321.
- Castellanos, J., V. J. Jaramillo, R. L. Sanford Jr., and J. B. Kauffman. 2001. Slash-and-burn effects on fine root biomass and productivity in a tropical dry forest ecosystem in Mexico. *For. Ecol. Manage.* 148: 41-50.
- Chappell, N. A., J. L. Ternan, and K. Bidin. 1999. Correlation of physicochemical properties and sub-erosional landforms with aggregate stability variations in a tropical Ultisol disturbed by forestry operations. *Soil Tillage Res.* 50: 55-71.
- Cody, R. O. and J. K. Smith. 1991. Applied statistics and the SAS programming language. North-Holland. New York, NY, USA.
- Cotler, H., E. Durán y C. Siebe. 2002. Caracterización morfo-edafológica y calidad de sitio de un bosque tropical caducifolio. pp. 17-79. In: F. Noguera, J. H. Vega, A. N. García y M. Quesada (eds.). Historia natural de Chamela. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Cotler, H. and M. P. Ortega-Larrocea. 2006. Effects of land use on soil erosion in a Mexican tropical dry forest ecosystem. *Catena* 65: 107-117.
- Etchevers B., J. D. 1988. Análisis químico de suelos y plantas. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 1984. Métodos físicos y químicos de análisis de suelos y agua. FAO. Roma, Italia.
- García-Oliva, F. y J. M. Maass. 1998. Efecto de la transformación de la selva a pradera sobre la dinámica de los nutrientes en un ecosistema tropical estacionario en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 62: 39-48.

- García-Oliva, F., R. L. Sanford, and E. Kelly. 1999. Effects of slash-and-burn management on soil aggregate organic C and N in a tropical deciduous forest. *Geoderma* 88: 1-12.
- Kaurichev. 1984. Practice of edafology. Mir Press. Moscow, URSS.
- Kemper, W. D. and R. C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. pp. 425-442. *In*: A. Klute (ed.). Methods of soil analysis. Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.
- Le Bissonnais, Y. 1995. Soil characteristics and aggregate stability. pp. 41-60. *In*: M. Agassi (ed.). Soil erosion, conservation, and rehabilitation. Marcel Dekker. New York, NY, USA.
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodability. I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 425-437.
- León-González, F., E. Celada-Tornel, C. I. Hidalgo-Moreno, J. D. Etchevers B., M. C. Gutiérrez-Castorena y A. Flores-Macias. 2006. Root-soil adhesion as affected by crop species in a volcanic sandy soil of Mexico. *Soil Tillage Res.* 90: 77-83.
- Martínez-Yrizar, A., A. Burquez, and J. M. Maass. 2000. Structure and functioning of tropical deciduous forest in Western Mexico. pp. 19-35. *In*: R. H. Robichaux and D. Yetman (eds.). The tropical deciduous forest of Alamos: biodiversity of a threatened ecosystem in Mexico. University of Arizona Press. Tucson, AZ, USA.
- Noguera F.A., J. H. Vega, A. N. García-Aldrete y M. Quesada. 2002. Historia natural de Chamela. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Roger-Estrade, J., G. Richard, J. Caneill, H. Boizard, Y. Coquet, P. Defosse, and H. Manichon. 2004. Morphological characterisation of soil structure in tilled fields: from a diagnosis method to the modelling of structural changes over time. *Soil Tillage Res.* 79: 33-49.
- Savinov, N. O. 1936. Soil physics. Sietchoziz Press. Moscow, URSS.
- Seybold, C. A. and J. E. Herrick. 2001. Aggregate stability kit for soil quality assessments. *Catena* 44: 37-45.
- Sumner, M. and W. Miller. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. pp. 1201-1229. *In*: D. L. Sparks (ed.). Methods of soil analysis. Chemical methods. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Topp, G. C., W. D. Reynolds, F. J. Cook, J. M. Kirby, and M. R. Carter. 1996. Physical attributes of soil quality. pp. 21-58. *In*: E. G. Gregorich and M. R. Carter (eds.). Soil quality for crop production and ecosystem health. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Trejo, I. and R. Dirzo. 2000. Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in Mexico. *Biol. Conserv.* 94: 133-142.
- Velázquez, A., J.-F. Mas, J. L. Palacio, and G. Bocco. 2002. Land cover mapping to obtain a current profile of deforestation in Mexico. *Unasylva* 53: 37-40.