

Efecto de diversos atributos topográficos sobre el carbono orgánico en varios usos del suelo

Salomón, Barrezueta-Unda¹

Resumen

El objetivo de este estudio fue: cuantificar la cantidad de carbono orgánico del suelo (COS) almacenado en tres profundidades y relacionar varios atributos topográficos sobre la densidad del COS en el sitio El Progreso, provincia El Oro-Ecuador. El estudio se realizó en cuatro usos del suelo: banano, cacao joven, cacao maduro y cacao viejo, con valores de COS entre cero a 0,10 m de 25,6g kg, 35,8g kg, 13,2g kg y 10,5g kg respectivamente, y las clases textural predominante son: franco arcillo limosa (0-0,10 cm) y franco arcillosa (0,30-0,40 cm). En cada suelo se delimitó 1 ha para tomar muestras de suelo a: cuatro profundidades cada 10 cm. Los atributos topográficos: area drenada (AS), factor de transporte de sedimentos (LS) y humedad del suelo (WTI), fueron tomados de un modelo de elevación digital (MDE) con una resolución de 12x12m. Los rangos de COS disminuyeron desde parte media de la zona en estudio (banano 38,4-8,1 Mg ha⁻¹; cacao joven 36,20-10,50 Mg ha⁻¹; cacao viejo 13,80-0,94 Mg ha⁻¹) con mayor pendiente (10 a 20%) hacia la parte baja (cacao maduro 18,80-08,40 Mg ha⁻¹). El uso de suelo cacao joven mostró el mayor valor de AS (10 286,5) y en LS (11,44). También se determinó diferencias significativas con el factor LS por cultivo y se correlacionó con el total de COS. Por tanto, LS (escorrentia) es el atributo topográfico que más influyo en el almacenamiento de COS.

Palabras clave: banano, cacao, modelo digital de elevación; secuestro de carbono.

Effect of different topographical attributes on organic carbon in several land uses

Abstract

The aim of this study was: to quantify the amount of soil organic carbon (SOC) stored at three depths and to relate various topographical attributes to the density of SOC at the site El Progreso, El Oro-Ecuador province. The study was conducted in four land uses: banana, young cocoa, mature cocoa and old cocoa, with SOC values between zero and 0,10 m of 25,6 g kg, 35,8 g kg, 13,2 g kg and 10,5 g kg respectively, and the predominant textural classes are: loamy clay (0-0.10 cm) and clay loam (0,30-0,40 cm). In each soil 1 ha was delimited to take soil samples at: four depths every 10 cm. The topographic attributes: drained area (AS), sediment transport factor (LS) and soil moisture (WTI), were taken from a digital elevation model (DEM) with a resolution of 12x12m. The SOC ranges decreased from the middle part of the area under study (banana 38,4-8,1 Mg ha⁻¹; young cocoa 36,20-10,50 Mg ha⁻¹; old cocoa 13,80-0,94 Mg ha⁻¹) with higher slope (10-20%) towards the lower part (mature cocoa 18,80-08,40 Mg ha⁻¹). Young cocoa land use showed the highest value of AS (10 286,5) and in LS (11,44). Significant differences were also determined with the LS factor by crop and correlated with the total SOC. Therefore, LS (runoff) is the topographic attribute that most influenced the storage of SOC.

Keywords: banana; cocoa; digital elevation model; carbon sequestration.

Recibido: 01 de diciembre de 2020

Aceptado: 04 de enero de 2021

¹ Doctor en investigación Agraria y Forestal; Profesor titular de la Universidad Técnica de Machala-Ecuador; sabarrezueta@utmachala.edu.ec; <http://orcid.org/0000-0003-4147-9284>

I. INTRODUCCIÓN

La pérdida del carbono orgánico del suelo (COS) en las regiones de montañas ubicadas en las zonas tropicales y subtropicales son atribuido al cambio en los usos del suelo (Wang *et al.*, 2018). Los atributos topográficos del terreno como la pendiente, elevación, dirección, factor de transporte de suelo, radiación solar, índice topográfico de humedad del suelo, entre otros, potencia su pérdida (de Blécourt *et al.*, 2017; Singh y Benbi, 2018). Sin embargo, los atributos topográficos difieren en magnitud en los diferentes sistemas agrícolas, por ejemplo en la redistribución del agua sobre los cultivos en terrenos con alta pendiente se incrementa la infiltración y la escorrentía (Senthilkumar *et al.*, 2009).

Los atributos topográficos de mayor influencia sobre el carbono son: altitud y pendiente que tienen un efecto significativo en la composición y la diversidad de las especies, por ende, influyen en el índice de generación de la biomasa que se almacena en el suelo; mientras que el aspecto o dirección de la pendiente inciden en la erosión del suelo, incrementando la escorrentía, por tanto la pérdida de suelo con la fracción de carbono orgánica (Zhang *et al.*, 2018).

En este marco, la topografía del terreno controla muchos procesos hidrológicos, geomorfológicos y edafológicos, que influyen en los atributos físicos, químicos y biológicos del suelo. De esta manera, los atributos topográficos derivados de un modelo de elevación digital (MED), se puede utilizar para explicar la diferencia entre los niveles de COS entre los diferentes horizontes del suelo. La estrecha relación entre la topografía y el desarrollo del suelo es suficiente para desarrollar a partir de los DEM los modelos predictivos del secuestro de carbono

(Malone *et al.*, 2009).

La Cordillera de los Andes, que atraviesa el Ecuador, las montañas disminuyendo su altitud en la región sur hacia el litoral, donde la agricultura ha devastado grandes cantidades de bosque, cambiando el uso del suelo hacia los sistemas agrarios tales como: banano, cacao y pastos (Hamer *et al.*, 2013; Paul *et al.*, 2008). En la provincia de El Oro, estos cambios del uso de suelo corresponde en su mayoría a la cuenca baja del Río Jubones (El Progreso, Pasaje, Quera, Ducos, Rajaro, etc.), principal fuente hídrica de la zona que proporciona agua para los cultivos descritos y para las ciudades de mayor población de la provincia (Barrezueta-Unda *et al.*, 2017). Con este contexto, se parte de la hipótesis que los suelos de la cuenca baja del Río Jubones por el cambio en el uso de suelo de montaña a sistema agrarios, la disponibilidad de COS almacenado está afectado por los atributos topográficos. Por tanto, el objetivo de este estudio fue: cuantificar la cantidad de carbono orgánico del suelo almacenado en tres profundidades y relacionar varios atributos topográficos con la densidad del carbono en el sitio El Progreso, provincia El Oro-Ecuador.

II MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del estudio

El levantamiento de la información se realizó en el sitio El Progreso, ubicado en la provincia de El Oro (Ecuador), entre las coordenadas geográficas: 3°17 '22" S; 79°45' 30" O (Figura 1). La precipitación media anual es de 912 mm y la temperatura media anual de 23°C. El paisaje de la zona está compuesto por las estribaciones bajas (< 500 m) de la cordillera andina occidental, cuyas laderas externas disminuyen de norte a sur.

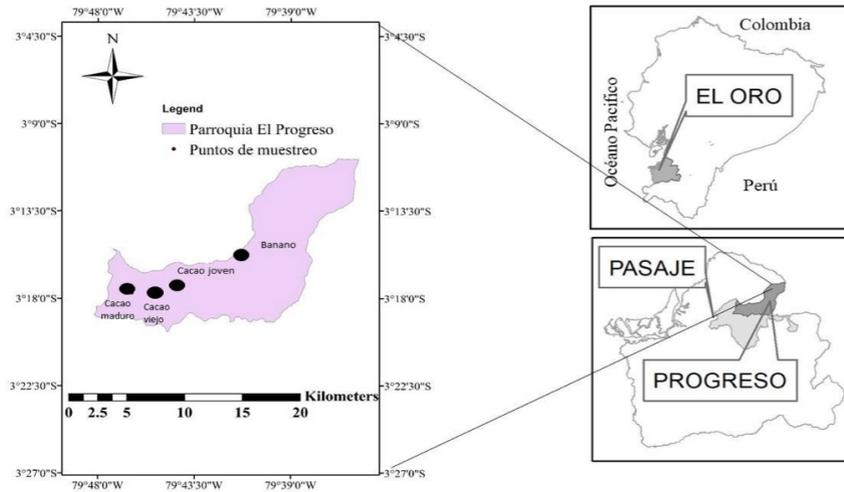


Figura 1. Ubicación del estudio

Toma de muestras de suelo

Las muestras de suelo se tomaron en cuatro usos del suelo: banano, cacao joven, cacao maduro

y cacao viejo. Todos los cultivos tuvieron un manejo monocultivo y de tipo agricultura orgánico, carentes de sistemas de riego automatizados (Tabla 1).

Tabla 1. Localización y características del uso del suelo en estudio

Usos del suelo	Pendiente (%)			Edad (años)
	Media	Mínima	Máxima	
Banana (clon Lacatan)	8,19	3,34	16,18	<25
Cacao joven (clon CCN51)	12,87	5,42	19,00	1
Cacao maduro (clon CCN51)	2,90	1,66	5,42	4
Cacao viejo (Clon Nacional)	15,48	2,43	2,06	>30

En cada uso de suelo se delimitó 1 hectárea, que se dividió en cinco subparcelas de 50 m por 50 m. El muestreo de la subparcela se realizó en forma de L, de 25 m de largo en vertical siguiendo la pendiente y 25 m en horizontal que se ubicó en la dirección que toma el aspecto de la montaña mismas que fueron demarcadas los puntos de muestreo a los 0 m, y al final de los 25 m en vertical y horizontal. Las muestras de suelo se tomaron con intervalos de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m y 0,30-0,40 m de profundidad; estructura de muestreo desarrollada por Singh y Benbi (2018) y modificada por Barrezueta et al. (2020).

Las muestras de suelo para determinar la densidad aparente (Da) fueron tomadas en cilindro metálicos de 5 cm de diámetro por 5 cm de alto, procurando que la muestra no se altere al extraer con un barreno. También se tomaron aproximadamente 1 kg de suelo con una pala, las

cuales fueron secadas al aire y tamizadas con tamiz de 2 mm para determinar los porcentajes de carbono orgánico, mediante el método de Walkley y Black (1934). Adicional se realizó la determinación de: arena, limo y arcilla por el método de Bouyucuos, y el pH (relación 1: 25 suelo:H₂O) en el laboratorio de Suelos de Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Machala.

Cálculo del carbono orgánico (COS) almacenado en el suelo

La cantidad de COS almacenado (concentración en el suelo fino < 2 mm) se calculó según la ecuación (1) (Minasny *et al.*, 2006), multiplicando el carbono orgánico (g kg) por la Da del suelo (kg m³), la profundidad (d) del muestreo (0.10 m) y por el factor 10 000 m² correspondientes a la superficie de las parcelas.

$$COS\ stock\ (Mg\ ha^{-1}) = Da * d * COS * 10\ 000\ (1)$$

Modelo de elevación digital (MED)

Para determinar los atributos topográficos se descargó de la plataforma Alaska Satellite Facility (<https://www.asf.alaska.edu/>) provisto por la NASA una cuadrícula de 12,5 m x 12,5 m del área de estudio. Los DEM extraídos corresponden al frame 7130/path 109 y frame 7120/path 109 del 13 de marzo de 2009. Luego se realizó una

composición con la herramienta Arctoolbox, dentro del programa ArcGis versión 10.3 (ESRI, 2014), obteniendo el DEM de la parroquia El Progreso (Figura 2a) y luego el aspecto de la pendiente (Figura 2b) y el mapa de sombra (Figura 2). También con el programa se realizó el cálculo de los atributos topográficos que se detallan a continuación.

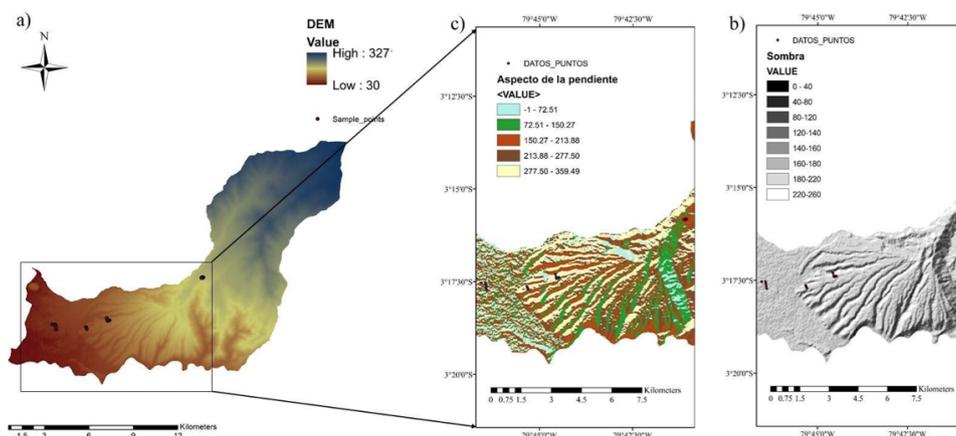


Figura 2. Delimitación del área en la parroquia El Progreso y puntos de muestreo: a) Modelo de elevación digital (MED), b) Clasificación del aspecto de la pendiente y c) Mapa de sombra

Flujo acumulado o área específica drenaje (*AS-Area of specific drainage*)

Se calcula por la suma de las células de la red que drenan a una célula receptora, luego se calcula la dirección del flujo de agua y cuántas unidades de agua recibe cada celda (Schmidt y Persson, 2003). Las celdas de salida que no reciben flujo son los altos topográficos locales y las crestas de las montañas (Schmidt y Persson, 2003). Se calculó con la ecuación (2).

$$AS = AC * \frac{L^2}{[(2L^2)^{1/2}]}$$

Siendo: AS = Área de drenaje específica, AC = Area de flujo acumulado (número de celdas), L= Longitud de la dirección del flujo.

Cálculo del índice de transporte potencial de sedimentos (LS- length of surface run-off)

Es una medida de la capacidad de transportar sedimentos del flujo de agua en un punto dado del paisaje (Moore y Wilson, 1992). El factor LS se calculó con la ecuación (3), propuesta por Wischmeier y Smith (1975).

$$Factor\ LS = (n + 1) * \left(\frac{AS}{22.13}\right)^n * \left(\frac{\sin \beta}{0.0896}\right)^m \quad (3)$$

Siendo: AS: área drenada específica; sin β: el seno de la pendiente (rad); n=0,4 ; y m=1,3

Cálculo índice Topográfico de humedad (TWI-topographic wetness index)

El índice de humedad topográfico (TWI-topographic wetness index) fue introducido por Beven y Kirkby (1979) como parte del modelo de escorrentía TOPMODEL y es probablemente el índice topográfico más aplicado. La ecuación (4) para obtener los valores de TWI es la descrita por Schmidt y Persson (2003).

$$Factor\ LS = (n + 1) * \left(\frac{AS}{22.13}\right)^n * \left(\frac{\sin \beta}{0.0896}\right)^m$$

Siendo: tan β = tangente de la pendiente local de la superficie del suelo; AS= área drenada específica.

Los valores obtenidos del índice TWI, se interpreta de la siguiente manera: las ubicaciones

con un área de pendiente ascendente grande reciben un valor de índice alto, y se espera que tengan una disponibilidad de agua relativamente más alta que las ubicaciones con un área de pendiente ascendente pequeña por lo tanto reciben un valor de índice menor. Las cumbres más empinadas reciben un valor pequeño y se espera que se drenen mejor a los lugares con pendientes suaves, que reciben un alto valor de índice. Por consiguiente, el TWI es una medición de las condiciones hidrológicas de un sitio determinado en el paisaje (Sørensen et al., 2006).

Extracción de datos

Con la herramienta ArcToolbox en Analysis tools, proximity (ArcGis versión 10.3) se generó un buffer de 12,5 m en cada punto de muestreo por uso de suelo. Este proceso generó valores estadísticos de media que fueron los utilizados en el análisis estadístico posterior.

Análisis estadístico

Las propiedades físico-químicas del suelo fueron tratadas con la media en todas las muestras de suelo. La variabilidad entre las posiciones de los usos del suelo de los niveles COS en los perfiles del suelo se realizó un ANOVA unidireccional. También, se evaluaron los efectos de los atributos topográficos AS, LS y TWI por uso de suelo sobre la media de COS almacenado mediante un ANOVA bidireccional. Cuando el resultado de ANOVA detectó una diferencia significativa, se realizó la prueba de HDS Tukey (significancia 5%). Todas las operaciones estadísticas se realizaron con el programa STATISCA versión 8 (Startsoft, 2007).

III. RESULTADOS

La profundidad del suelo en el que se tomaron las muestras (hasta 40 cm), es el área de mayor actividad bioquímica, por lo que es determinante el uso de suelo y las propiedades carbono orgánico (CO), Da y los porcentajes de arena, limo y arcilla (Wilcke et al., 2002). Resultado que se presentan en Tabla 2.

Los valores de CO son menores en el cacao viejo y se incrementan en el cacao joven, banano y cacao maduro, respectivamente. Los picos más altos de CO se ubican entre cero a 0.10 m (25,6 g kg,

banano – 35,8 g kg, cacao joven – 13,2 g kg, cacao maduro; 10,5 g kg, cacao viejo) y disminuyeron hasta las capas comprendidas entre 0,20-0,30 m (3,0 g kg, cacao maduro; 3,2 g kg, cacao viejo) y de 0,30-0,40 m (5,2 g kg, banano; 8,4 g kg, cacao joven). Distribución de CO, que no tuvo relación con el pH del suelo que fue ácido en banano (rango pH 6,1-5,74), cacao joven (rango, 5,14-5,8) y cacao viejo (5,67-5,71), mientras el uso de suelo cacao maduro los valores de pH fueron ligeramente alcalinos con una variación entre de 7,36 (0-0.10 m) a 7,12 (0,30-0,40 m).

En el caso de la Da, los valores más altos oscilan entre 1,42 gm³ (0,0-0,10 m) a 1,56 gm³ (0,20-0,3 m) y 1,46 gm³ (0,0-0,10 m) a 1,68 gm³ (0,30-0,040 m) en banano y cacao maduro, respectivamente, rangos que indican una ligera compactación de los horizontes (SAGARPA, 2012), mientras en el cacao joven el menor valor corresponde a 1,08 g m³ (0-0,10 m). La relación del descenso significativo del CO a medida que aumenta la Da en zonas de pendiente moderada, también fue corroborado por Zhao *et al.*, (2016) y Zhu *et al.*, (2017). La intensidad en el laboreo del suelo tiene influencia en la Da, así como también el aporte de biomasa que forma el mantillo (hojarasca), aumentando los niveles de CO en la capa orgánica del suelo (0,0-0,10 m), en este caso el uso anterior (bosque) del suelo cacao joven pudo influenciar en los niveles de CO a pesar de tener una pendiente que osciló entre 5,42% a 19%.

Los porcentajes de arena y limo fueron muy próximos en las dos primeras capas, pero aumento los niveles de arcilla en decremento del limo en las siguientes capas, como se muestra en la Tabla 2 con rangos 31,20–38,80%, 24,0–47,20%, 19,60–39,33% para arena, limo y arcilla respectivamente entre 0-0,10 m y de 34,0–38,22%, 23,11–30,40%, 34,8–38,67% respectivamente entre 0,30 m a 0,40 m. Distribución granulométrica similar fue determinada por Barrezueta *et al.* (2020) en suelos del orden Alfisol e Inceptisol de la provincia El Oro. Estos valores sugieren que son suelos moderadamente erosionados, principalmente en la ladera superior y media de la zona en estudio. Koning *et al.* (2003) en la cordillera de los andes ecuatoriano también encontraron suelos de textura fina que reduce el contenido de CO a medida que

disminuye la pendiente y aumenta la profundidad de muestreo. Por otra parte, el contenido de arcilla afecta de forma positiva al almacenamiento de CO (Ruiz Potma Goncalves *et al.*, 2017), aunque los valores de arcilla aumentaron en 30-40 cm, se

observó una relación inversa en los usos del suelo banano y cacao joven, donde el carbono disminuyó, resultados encontrados en otras investigaciones con pendientes > 20% (Beach *et al.*, 2018; de Blécourt *et al.*, 2017; Singh y Benbi, 2018).

Tabla 2. Análisis descriptivos de varias propiedades físicas y químicas de los usos de suelo en estudio

Usos del suelo	Profundidad (m)	Carbono (g kg)	Da (g m ³)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
Banano						
	0-0,10	25,6	142	38,80	41,60	19,60
	0,10-0,20	12,2	1,52	40,40	37,20	22,40
	0,20-0,30	8,0	1,56	36,40	31,60	32,00
	0,30-0,40	5,2	1,54	34,40	28,80	36,80
Cacao joven						
	0-0,10	35,8	1,08	31,20	47,20	21,60
	0,10-0,20	15,4	1,26	30,80	36,80	32,40
	0,20-0,30	10,4	1,26	31,20	32,80	36,00
	0,30-0,40	8,4	1,26	34,00	27,60	38,40
Cacao maduro						
	0-0,10	13,2	1,46	33,60	39,20	27,20
	0,10-0,20	7,8	1,56	33,60	34,00	32,40
	0,20-0,30	3,0	1,68	34,80	30,00	35,20
	0,30-0,40	5,0	1,68	34,80	30,40	34,809
Cacao viejo						
	0-0,10	10,5	1,39	36,67	24,00	39,33
	0,10-0,20	8,2	1,47	38,00	24,00	38,00
	0,20-0,30	3,8	1,59	40,00	21,33	38,67
	0,30-0,40	7,55	1,48	38,22	23,11	38,67

Los niveles de COS almacenados mostraron diferencias significativas en todos los usos de suelo por profundidad (Figura 3). Los picos más altos de COS almacenado fue entre 0-0.10 m en cacao joven (38.4 Mg ha⁻¹; Figura 3b), seguido de banano (36.2 Mg ha⁻¹, Figura 3a), luego los valores descienden a la mitad entre 0.10-0.20 m (19.3 Mg

ha⁻¹ y 18.0 Mg ha⁻¹, respectivamente). Mientras que el COS almacenado en cacao maduro y cacao viejo estuvieron bajo los 18.8 Mg ha⁻¹ (Figura 3c) y 13.80 Mg ha⁻¹ (Figura 3d), respectivamente. Comportamiento del COS similar al determinado por Barrezueta Unda *et al.*, (2018) en suelos con siembra de cacao menor a 5 años en la provincia de El Oro.

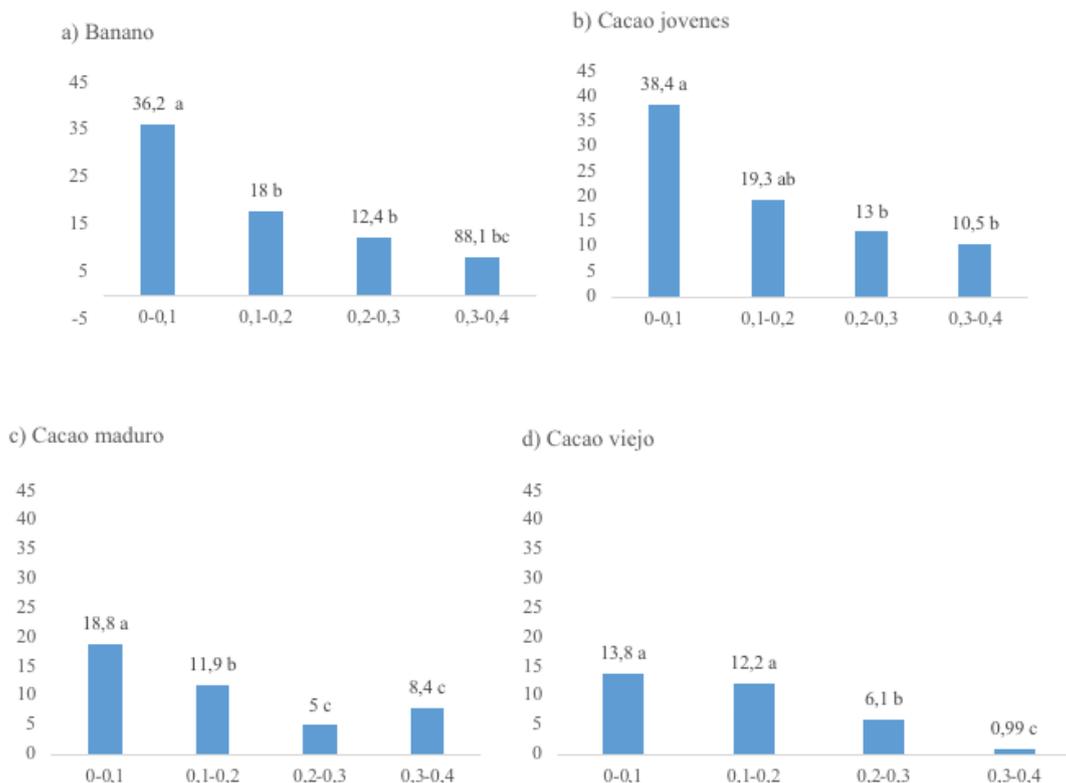


Figura 3. Comparación de medias por uso de suelo y profundidad del carbono orgánico almacenado: a) Banano, b) Cacao joven, c) Cacao maduro, d) Cacao viejo.

El análisis estadístico de los atributos topográficos AS, LS y WTI se presentan en la Tabla 3. Los valores de AS no indican significancia estadística entre los usos del suelo. El valor más alto corresponde a las áreas de mayor pendiente ascendente (Figura 4a), para los usos de suelo cacao joven (10 286,50 m²) y banano (3 312,25 m²). En ambos usos del suelo algunos puntos de muestreo se tomaron en sitios con un micro-relieve de pendiente escarpada (cóncava), provocando valores máximos (10 142,50 m² en banano y 51 195,00 m² en cacao joven) que tienen influencia en la desviación estándar de los datos. Una mayor área de drenaje con pendiente cóncava es un factor negativo para una mayor acumulación de COS (Liu *et al.*, 2013), en este caso los suelos se ubican en sitios de aspecto cóncavo en especial entre cacao maduro y cacao viejo (Figura 2b). Así mismo, una mayor exposición solar tiene gran influencia en los tres usos de suelo de cacao (Figura 2c).

La escorrentía representada en el factor LS presenta significancia estadística ($p < 0,05$) entre

el cacao joven y el cacao viejo con respecto al resto de usos del suelo, también se observa en la Figura 4b que la escorrentía toma diferentes direcciones, movilizandolos sedimentos del suelo hacia el interior de la montaña en banano y hacia el exterior en los usos del suelo cacao. El valor extrema de LS, se registra en el cacao joven (28,43) ubicado en la parte media de la montaña, y los mayores promedios por uso de suelo se ubican en: cacao joven (11,44 m²), cacao viejo (9,90 m²), banano (6,23 m); que son los usos de suelo con mayor pendiente (Tabla 1). El menor valor fue de 1,03 que corresponde al uso de suelo cacao maduro, que se encuentra en la zona de mayor acumulación de sedimentos (Figura 4b). Cambio abrupto que está en relación con el aspecto de la pendiente que es menos cóncava en el uso del suelo cacao maduro (Figura 2b).

Por otra parte, los resultado de LS son inferiores a 7,27, determinados por Moreira de Souza y Trondoli Matricardi, (2013), que probó varias resolución de MED (30x30 m y 90x90 m).

En el estudio la resolución es menor por tanto los valores del factor LS disminuyen, reduciendo la incertidumbre en la estimación de la escorrentía (Nabiollahi *et al.*, 2019).

El factor de humedad medido con el índice WTI muestra significancia entre los usos del suelo. El mayor valor máximo de WTI se ubica en cacao joven (10,17), mientras que el mayor valor medio corresponde al cacao maduro (7,19) que se encuentra en el terreno más plano (Figura 4c), y el menor valor medio corresponde al cacao viejo (5,21). Sørensen *et al.* (2006) calcularon un rango de 2 a 14 del atributo WTI con un DEM de resolución 10x10 m, con aumento del índice parte plana de la montaña, similar a lo determinado en el estudio. Schmidt y Persson (2003), mencionan

al interpretar los mapas WTI, que se debe evaluar el movimiento lateral del agua en el terreno, con el rango de elevación y la pendiente, en el cacao maduro existe menor escorrentía (rango LS, 0,69-1,31) y ubicada en el pie de la montaña por tanto es un área de acumulación de sedimentos (menor elevación y pendiente) aunque se encuentra en un área de mayor exposición solar que el uso de suelo banano (Figura 2c), pero los factores señalados pudieron incidir en la significancia estadística calculada.

Por otra parte, Seibert *et al.*, (2007) encontraron una fuerte correlación entre los suelos de pH neutros en el horizonte orgánico, que mostraban valor de WTI mayores, similar efecto observado en el uso del suelo cacao maduro (Tabla 3).

Tabla 3. Análisis descriptivos de varias propiedades físicas y químicas de los usos de suelo en estudio

Atributos topográficos	AS			LS			WTI		
Usos del suelo	Media	Min	Max	Media	Min	Max	Media	Min	Max
Banano	3 312,25	28,13	10	6,23 ab	2,60	14,69	634 ab	4,68	8,56
Cacao joven	10 286,50	34,38	51	11,44 a	4,72	28,43	6,14 ab	4,57	10,17
Cacao maduro	174,50 a	25,00	547,50	1,03 b	0,69	1,31	7,19 a	5,62	8,79
Cacao viejo	77,71 a	15,63	177,50	9,90 a	1,40	18,35	5,21 b	4,41	6,06

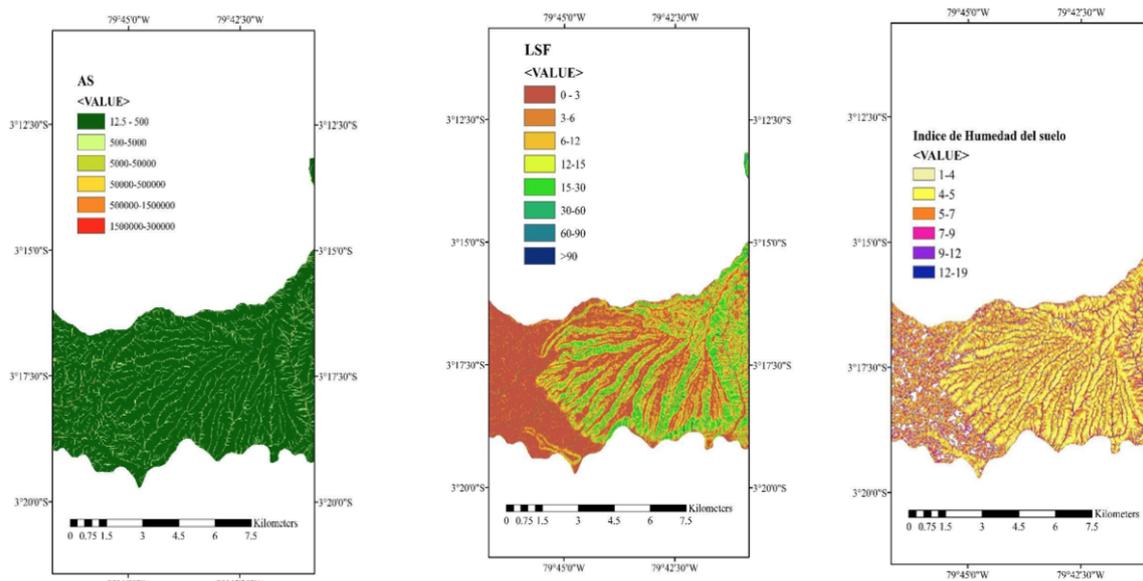


Figura 4. Atributos topográficos obtenidos para el área en estudio: a) Área de contribución (AS), b) factor de escorrentía o transporte de sedimentos (LS), c) índice de humedad del suelo (WTI)

La Tabla 4, indica la significancia del total de COS por uso de suelo y las diferentes capas de donde se tomaron las muestras en el factor LS. La mayor acumulación de COS por uso de suelo se produce en el cacao joven (81,26 Mg ha⁻¹, seguido de banano (74,62 Mg ha⁻¹), cacao maduro (44,16 Mg ha⁻¹) y el cacao viejo (32,11 Mg ha⁻¹), y en profundidad la capa de 0-0,10 m presentan el mayor almacén de COS con 107,23 Mg ha⁻¹, resultados que desciende a 27,04 Mg ha⁻¹ en la última capa de 0,30-0,40 m. La interacción de los factores fijos también mostró diferencias significativas sobre el total de COS, Sin embargo, no existió diferencias estadísticas entre

la interacción cultivo x profundidad. Dorji *et al.* (2014) encontraron significancia entre los usos de suelo con los atributos topográficos de aspecto y dirección de la pendiente y una mayor acumulación de COS en la posición más alta de la montaña, atribuyendo este resultado a la acumulación de biomasa de las especies vegetales, en el estudio el factor LS pudo incidir en un transporte de CO₂, hacia las posiciones más baja del sitio en estudio, pero el continuo aporte de biomasa desde las plantas de banano, aunque esté en una zona de menor sombra y mayor escorrentía puede aportar mayor CO₂ en el suelo, en especial en la primera capa.

Tabla 4. Análisis de varianza (ANOVA) de dos vías calculados para los factores COS total cultivo y COS total profundidad.

Factores (Mg ha ⁻¹)	Usos del suelo				p-valor 0.05		
	Banano	Cacao joven	Cacao maduro	Cacao viejo	AS	LS	WTI
Total COS cultivo	74,62	81,26	44,16	32,11	0,184	0,001	0,19
Total COS profundidad	107,23	61,41	36,47	27,04			
interacción						0,002	
Cacao viejo						0,12	

IV. CONCLUSIONES

Los usos de suelo con mayor almacenamiento de carbono en el sitio El Progreso, corresponde a los usos de suelo cacao joven y banano, que se localizan en la sección media y alta de la montaña respectivamente. En todos los usos de suelo la mayor acumulación de COS se presenta en la primera capa con descenso a medida que se profundiza el muestreo.

El uso de suelo cacao maduro mostró el menor y mayor pico del factor LS y de WTI, en ese orden. También se determinó diferencias significativas con el factor LS por cultivo. Por tanto, la escorrentía (LS) es el atributo topográfico que más influye en el almacenamiento de COS.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barrezueta-Unda, S., Prado-Carpio, E., & Jimbo-Sarmiento, R. (2017). Características del Comercio de cacao a nivel intermediario en la provincia de El Oro-Ecuador. *European Scientific Journal*, 13(16), 273–282. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n16p273>

Barrezueta-Unda, S., Velepucha, K., Solano, M., & Hurtado, L. (2020). Secuestro de carbono orgánico del suelo en pastizales de la provincia El Oro, Ecuador. *Revista Ciencia UNEMI*, 13(32), 14–26. <http://ojs.unemi.edu.ec/index.php/cienciaunemi/article/view/901/1002>

Barrezueta Unda, S., Luna-Romero, E., & Barrera-León, J. (2018). Almacenamiento del carbono en varios suelos cultivados con cacao en la provincia El Oro-Ecuador. *Agroecosistemas*, 6(1), 147–154.

Beach, T. P., Ulmer, A., Beach, T., Ulmer, A., Cook, D., Brennan, M. L., Luzzadder-beach, S., Doyle, C., Eshleman, S., & Krause, S. (2018). Geoarchaeology and tropical forest soil catenas of northwestern Belize. *Quaternary International*, 463(January), 198–217. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.02.031>

Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43–69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>

- de Blécourt, M., Corre, M. D., Paudel, E., Harrison, R. D., Brumme, R., & Veldkamp, E. (2017). Spatial variability in soil organic carbon in a tropical montane landscape: associations between soil organic carbon and land use, soil properties, vegetation, and topography vary across plot to landscape scales. *SOIL*, 3(3), 123–137. <https://doi.org/10.5194/soil-3-123-2017>
- Dorji, T., Odeh, I., & Field, D. (2014). Vertical Distribution of Soil Organic Carbon Density in Relation to Land Use/Cover, Altitude and Slope Aspect in the Eastern Himalayas. *Land*, 3(4), 1232–1250. <https://doi.org/10.3390/land3041232>
- ESRI. (2014). *ArcGIS* (10.3). www.esri.com
- Garcia-Pausas, J., Casals, P., Camarero, L., Huguet, C., Sebastià, M.-T., Thompson, R., & Romanyà, J. (2007). Soil organic carbon storage in mountain grasslands of the Pyrenees: effects of climate and topography. *Biogeochemistry*, 82(3), 279–289. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9071-9>
- Hamer, U., Potthast, K., Burneo, J. I., & Makeschin, F. (2013). Nutrient stocks and phosphorus fractions in mountain soils of Southern Ecuador after conversion of forest to pasture. *Biogeochemistry*, 112(1–3), 495–510. <https://doi.org/10.1007/s10533-012-9742-z>
- Koning, G. H. J. De, Veldkamp, E., & López-Ulloa, M. (2003). Quantification of carbon sequestration in soils following pasture to forest conversion in northwestern Ecuador. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2003GB002099>
- Liu, F., Zhang, G.-L., Sun, Y.-J., Zhao, Y.-G., & Li, D.-C. (2013). Mapping the Three-Dimensional Distribution of Soil Organic Matter across a Subtropical Hilly Landscape. *Soil Science Society of America Journal*, 77(4), 1241–1253. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0317>
- Malone, B. P., McBratney, A. B., Minasny, B., & Laslett, G. M. (2009). Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. *Geoderma*, 154(1–2), 138–152. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.10.007>
- Moore, I. D., & Wilson, J. P. (1992). Length-slope factors for the revised universal soil loss equation: simplified method of estimation. *Journal of Soil & Water Conservation*, 47(5), 423–428.
- Moreira de Souza, G., & Trondoli Matricardi, E. A. (2013). Análise comparativa dos modelos de elevação SRTM, ASTER GDEM e TOPODATA para estimar o fator topográfico da USLE. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 4435–4442.
- Nabiollahi, K., Eskandari, S., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., & Triantafyllis, J. (2019). Assessing soil organic carbon stocks under land-use change scenarios using random forest models. *Carbon Management*, 10(1), 63–77. <https://doi.org/10.1080/17583004.2018.1553434>
- Paul, S., Flessa, H., Veldkamp, E., & López-Ulloa, M. (2008). Stabilization of recent soil carbon in the humid tropics following land use changes: evidence from aggregate fractionation and stable isotope analyses. *Biogeochemistry*, 87(3), 247–263. <https://doi.org/10.1007/s10533-008-9182-y>
- Ruiz Potma Goncalves, D., Sá, J. C. de M., Mishra, U., Cerri, C. E. P., Ferreira, L. A., & Furlan, F. J. F. (2017). Soil type and texture impacts on soil organic carbon storage in a sub-tropical agro-ecosystem. *Geoderma*, 286, 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.021>
- SAGARPA. (2012). Subíndice de Uso Sustentable del Suelo – Metodología de Cálculo. In *Línea de Base del Programa de Sustentabilidad de los Recursos Naturales Subíndice* (pp. 1–66). FAO.
- Schmidt, F., & Persson, A. (2003). Comparison of DEM data capture and topographic wetness indices. *Precision Agriculture*, 4(2), 179–192. <https://doi.org/10.1023/A:1024509322709>
- Seibert, J., Stendahl, J., & Sørensen, R. (2007). Topographical influences on soil properties in boreal

- forests. *Geoderma*, 141(1–2), 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.05.013>
- Senthilkumar, S., Kravchenko, A. N., & Robertson, G. P. (2009). Topography Influences Management System Effects on Total Soil Carbon and Nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 73(6), 2059. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0392>
- Singh, P., & Benbi, D. K. (2018). Soil organic carbon pool changes in relation to slope position and land-use in Indian lower Himalayas. *Catena*, 166(March), 171–180. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.006>
- Sørensen, R., Zinko, U., & Seibert, J. (2006). On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(1), 101–112. <https://doi.org/10.5194/hess-10-101-2006>
- Startsoft. (2007). *Statistica* (No. 8). www.statsoft.com
- Wang, X., Yoo, K., Wackett, A. A., Gutknecht, J., Amundson, R., & Heimsath, A. (2018). Soil organic carbon and mineral interactions on climatically different hillslopes. *Geoderma*, 322(2), 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.021>
- Wilcke, W., Yasin, S., Abramowski, U., Valarezo, C., & Zech, W. (2002). Nutrient storage and turnover in organic layers under tropical montane rain forest in Ecuador. *European Journal of Soil Science*, 53, 15–27.
- Wischmeier, W., & Smith, D. (1975). Predicting rainfall erosion losses: Losses from cropland east of the Rocky Mountains. In *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning* (p. 60 pp). Department of Agriculture.
- Zhang, X., Liu, M., Zhao, X., Li, Y., Zhao, W., Li, A., Chen, S., Chen, S., Han, X., & Huang, J. (2018). Topography and grazing effects on storage of soil organic carbon and nitrogen in the northern China grasslands. *Ecological Indicators*, 93(June), 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.068>
- Zhao, W., Zhang, R., Huang, C., Wang, B., Cao, H., Koopal, L. K., & Tan, W. (2016). Effect of different vegetation cover on the vertical distribution of soil organic and inorganic carbon in the Zhifanggou Watershed on the loess plateau. *Catena*, 139, 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.003>
- Zhu, M., Feng, Q., Qin, Y., Cao, J., Li, H., & Zhao, Y. (2017). Soil organic carbon as functions of slope aspects and soil depths in a semiarid alpine region of Northwest China. *CATENA*, 152, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.011>