



Scientia Agropecuaria

Web page: <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop>

Facultad de Ciencias
Agropecuarias

Universidad Nacional de
Trujillo

RESEARCH ARTICLE



Relationship between isotopic response ($\delta^{13}\text{C}$) and physicochemical properties: Taxonomy of soils in the Monzón Valley in the high jungle of Peru

Relación entre la respuesta isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) y las propiedades fisicoquímicas: Taxonomía de suelos del Valle de Monzón en la selva alta del Perú

Nicolás S. Torres-Upiachihua^{1*} ; Rodrigo F. Lagos-Damas¹ ; Leodan Toribio-Dueñas¹ ; Julio A. Chia-Wong¹ ; Vladimir Eliodoro-Costa² ; Llerme Navarro-Vásquez¹

1 Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), Facultad de agronomía, Tingo María, Perú.

2 Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências - Câmpus de Botucatu, Centro de Isótopos Estáveis Prof. Dr. Carlos Ducatti, Botucatu, Brasil.

* Corresponding author: nicolas.torres@unas.edu.pe (N. S. Torres-Upiachihua).

Received: 18 July 2025. Accepted: 7 October 2025. Published: 27 October 2025.

Abstract

Identifying the carbon isotopic ratio is valuable for analyzing and understanding soil classification and dynamics. This study evaluated and related the soil isotopic ratio and its main properties (physicochemical) in the Monzón Valley. Fifteen pits were sampled within the strata of a toposequence. $\delta^{13}\text{C}$ was determined using an isotope ratio mass spectrometry system coupled with an EA-IRMS elemental analyzer. To obtain accurate results, samples were categorized based on their depth. Between 500 and 600 μg of soil were weighed for samples <40 cm deep, and between 1500 and 2000 μg for samples deeper than 40 cm. The results provided information on the stable carbon content of the soil, separating each sample by its soil profile, depth, pH, color, Al, cultivar, carbon stock, taxonomic classification, among others. Differences in properties were found among the profiles studied, with quantitative variation in horizons, including the water table in some, and three soil orders. The $\delta^{13}\text{C}$ ordering shows that Inceptisols exhibit mixtures of crops from C3 and C4 plants; this is likely due to historical human interference at certain depths. For Entisols, there is a lack of diagnostic horizon formation, with a predominance of C3 plants; however, in Alfisols the greatest uptake was in the surface horizon.

Keywords: C3 and C4 photosynthesis; soil profiles; agricultural crops.

Resumen

Identificar la razón isotópica del carbono resulta valioso para analizar y entender la clasificación y la dinámica de los suelos. Este estudio evaluó y relacionó la razón isotópica del suelo y sus propiedades principales (físico - químicas) en el Valle del Monzón. Se muestrearon 15 calicatas, entre los estratos de una toposecuencia. El $\delta^{13}\text{C}$ fue determinado con un sistema de espectrometría de masas de relación isotópica acoplado a un analizador elemental EA-IRMS. Para obtener resultados correctos, se consideró muestras en base a su profundidad. Se pesó entre 500 a 600 μg de suelo para muestras < 40 cm de profundidad, y para muestras que superaron los 40 cm, se pesó entre 1500 a 2000 μg . Los resultados proporcionaron información sobre el contenido de carbono estable en el suelo separadas cada muestra por su perfil de suelo, profundidad, pH, color, Al, cultivo, stock de carbono, clasificación taxonómica, entre otros. Se encontraron diferencias de las propiedades entre los perfiles estudiados, existiendo una variación cuantitativa de horizontes, en algunos encontrándose la napa freática y determinándose tres órdenes del suelo. El $\delta^{13}\text{C}$ en base a los órdenes, se evidencia que en los Inceptisols existen mezclas de cultivos provenientes de plantas C3 y C4, probablemente esto se deba a que en ciertas profundidades hubo interferencias antrópicas a nivel histórico. Para los Entisols, existe una carencia de formación de horizonte de diagnóstico, existiendo predominancia de plantas C3, sin embargo, en el Alfisol la mayor captación fue en el horizonte superficial.

Palabras clave: fotosíntesis C3 y C4; perfiles de suelo; cultivos agrícolas.

DOI: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2026.008>

Cite this article:

Torres-Upiachihua, N. S., Lagos-Damas, R. F., Toribio-Dueñas, L., Chia-Wong, J. A., Eliodoro-Costa, V., & Navarro-Vásquez, L. (2026). Relación entre la respuesta isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) y las propiedades fisicoquímicas: Taxonomía de suelos del Valle de Monzón en la selva alta del Perú. *Scientia Agropecuaria*, 17(1), 111-122.

1. Introducción

A nivel mundial la sustitución de la vegetación natural por otros sistemas y usos de suelo ha generado importancia en el acumulo y generación de stock de carbono del suelo, el cual varía por las condiciones del clima, relieve, especies vegetales y el tipo de suelo, sumado a ellos la acción antrópica que es uno de los pilares más fuertes en generar modificaciones de ciertas características naturales del suelo que fueron adquiridos durante décadas (Gao et al., 2024). Por lo cual, en el contexto global del cambio climático, el estudio del carbono en suelos a nivel mundial manifiesta su influencia en su clasificación, dinámica y capacidad de almacenamiento, siendo la razón isotópica $\delta^{13}\text{C}$ clave para su análisis ambiental (Krüger et al., 2024).

La zona del Valle del Monzón en la selva alta en el centro-norte del Perú, localizada en áreas de clima tropical con temperaturas altas y precipitaciones muy marcantes, variando sus áreas de acuerdo a factores de formación del suelo como es el caso de las condiciones de clima, especie vegetal y relieve, sumado a ello, la acción antrópica fue capaz de modificar rápidamente ciertas características naturales del suelo que fueron adquiridas a lo largo de millones de años (Contreras, 2021).

Ante lo manifestado los cambios están relacionados con las funciones básicas del suelo, teniendo una estrecha relación con la materia orgánica del suelo, pues el contenido de carbono orgánico juega un papel crucial en mantener la calidad del suelo, la producción de cultivos y la calidad ambiental (Gutiérrez et al., 2024). Esta característica de los suelos en Valle del Monzón se condiciona a una pequeña profundidad efectiva, con un pH ácido y un grado bajo de desarrollo pedogenético. Los contenidos de carbono son estudiados como uno de los principales criterios de diferenciación en los sistemas de clasificación de suelo, como Soil Taxonomy (USDA, 2022), siendo estos contenidos determinantes especialmente para la clasificación pues estos permiten comprender el grado de desarrollo, variedad de tipos de suelos y su comportamiento frente a diferentes usos y manejo.

Estudiar el entorno del suelo permite comprender sus procesos (físico, químico y biológico), las cuales provenían de metodologías antiguas, sin embargo, el estudio de relaciones isotópicas hoy en día es una herramienta que revela cómo los recursos se mueven dentro de los ecosistemas, las relaciones isotópicas permiten obtener información valiosa sobre el origen, edad, procesos de formación y dinámica del suelo, eso quiere decir que ayuda a distinguir entre diferentes tipos de agricultura, como la producción

de cultivos ha evolucionado generando un impacto en el suelo y el medio ambiente. Los isótopos de carbono como es el caso del delta carbono 13 ($\delta^{13}\text{C}$) estable proporciona metodologías para poder estudiar los residuos orgánicos y cómo realizan el proceso de transformación en MOS. Neaman (2024) indica que los métodos isotópicos, como la proporción natural de C^{13} , son sumamente útiles porque facilitan la estimación del tiempo de la materia orgánica. La proporción de C^{13} natural es adecuada para evaluar tasas de recambio en escalas de tiempo desde años hasta siglos.

La razón isotópica del carbono, especialmente $\delta^{13}\text{C}$, puede ser un indicador de cambios en las fuentes de carbono, la productividad fotosintética y las condiciones ambientales, que a su vez están relacionados con la topografía de un área. Al analizar las variaciones en $\delta^{13}\text{C}$ en sedimentos, es posible reconstruir la toposecuencia pasada y entender cómo la topografía ha evolucionado con el tiempo (Martínez et al., 2018).

El $\delta^{13}\text{C}$ es determinado al encontrar la diferencia en la relación $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ en una muestra analizada al ser comparada con la relación $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ del estándar internacional PDB-Vienna, y esta diferencia se expresa como una proporción (en partes por mil) de la relación isotópica del estándar (Barrezueta et al., 2019). El uso de técnicas isotópicas de análisis mediante el estudio de la abundancia natural en ^{13}C permite obtener información acerca de los procesos de sustitución del tipo de carbono orgánico del suelo en los suelos, en la medida que existan diferencias en la relación $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ debido a las diferencias isotópicas entre las especies C_3 y C_4 (Barrezueta et al., 2019). En los tejidos de las plantas C_3 se diferencia en la abundancia natural de $\delta^{13}\text{C}$ y que carbono se ha utilizado como un marcador de carbono orgánico del suelo para estudios in situ (Berriel et al., 2014).

El $\delta^{13}\text{C}$ de los diferentes mecanismos fotosintéticos de plantas C_3 y C_4 es el resultado de la fijación primaria de CO_2 por enzimas, limitación de la difusión de CO_2 en las hojas y relación entre la presión interna de CO_2 . Diferencias isotópicas naturales permiten que el carbono derivado de cada ciclo fotosintético se ubique en el reservorio de materia orgánica del suelo, siendo cada vez más utilizado para estudios paleo ambientales, ya que permite documentar cambios de vegetación en suelos de distintas edades. En particular, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ son utilizados para identificar el origen de la materia orgánica, ya que los valores isotópicos en las plantas son función de la vía de fotosíntesis C_3 o C_4 (Fuchs et al., 2015).

La razón isotópica del carbono ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) en el suelo, medida como $\delta^{13}\text{C}$, puede ser un indicador útil para entender la clasificación y dinámica del suelo, aunque no define directamente la taxonomía del suelo según sistemas como el Soil Taxonomy de EE. UU. o la World Reference Base for Soil Resources (WRB). La razón isotópica refleja principalmente la fuente de materia orgánica y la actividad biológica, lo cual puede estar relacionado con las propiedades del suelo y relieve que influyen en su clasificación (Carrión et al., 2021).

En el Perú son pocas las investigaciones publicadas sobre relaciones isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$, como los realizados en la cordillera de los Andes por Rolando et al. (2018), en el caso de la selva alta del norte peruano (zonas tropicales) existe una carencia de estudios referente a los perfiles isotópicos del Valle del Monzón. Por lo cual este presente trabajo propuso evaluar las variaciones de $\delta^{13}\text{C}$ determinadas

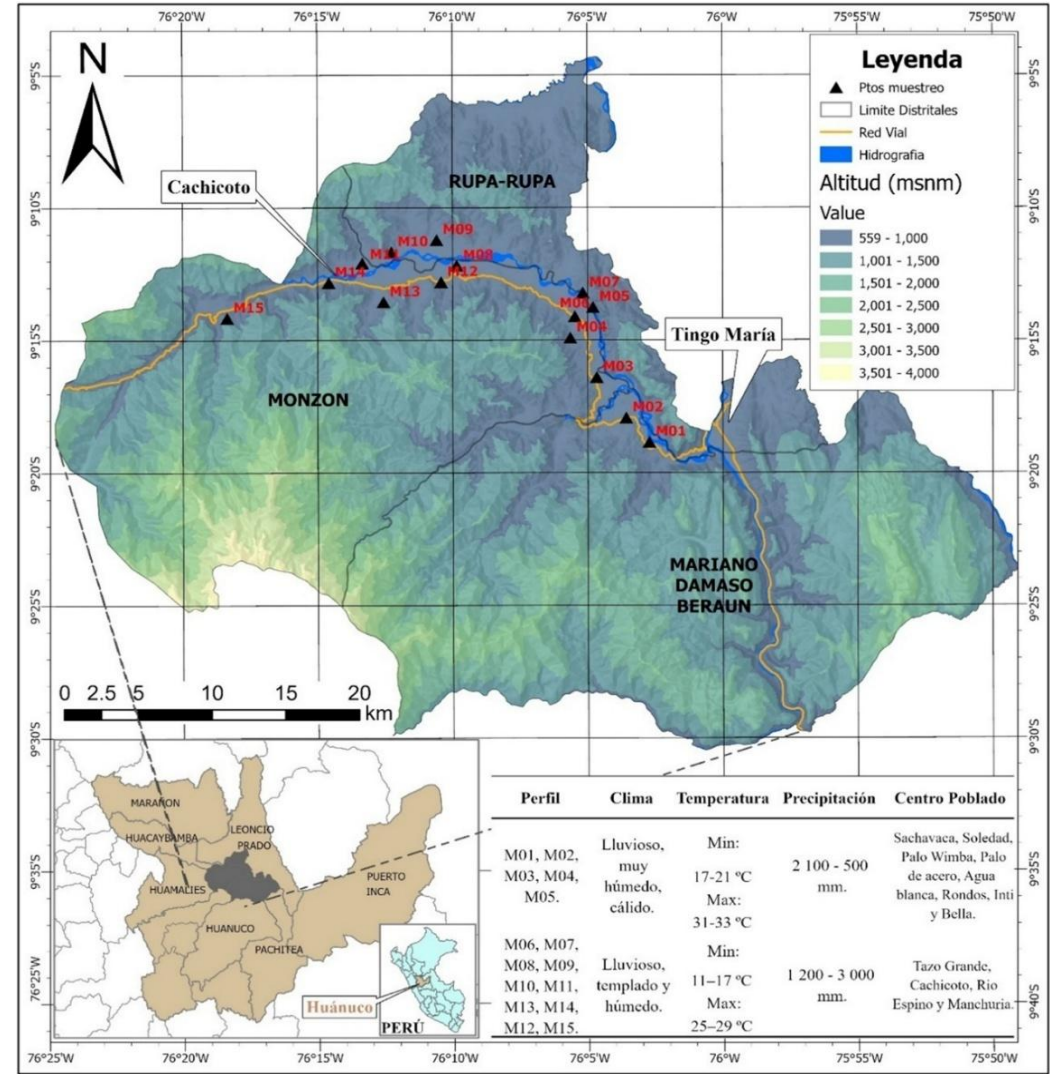
en el suelo, relacionadas en base a la toposecuencia del Valle del Monzón.

2. Metodología

Área de estudio

Se localizó en el Valle de Monzón de la provincia de Huamalíes, departamento Huánuco, donde se evaluaron un total de 15 perfiles de suelo. Datos relacionados a la climatología y ubicación se presentan en la Figura 1.

Las zonas de muestreo presentan una vegetación diversa, dependiendo del lugar de la excavación se podría encontrar vegetación espontánea, forraje, cultivo de cacao (*Theobroma cacao*), coca (*Erythroxylum coca*), especies arbóreas, etc. Los suelos muestreados cumplen con las características de la clasificación taxonómica “Soil Taxonomy” en los cuales fueron determinados tres órdenes, siendo los Entisols, Inceptisols y Alfisols (USDA, 2022).



Muestreo y excavación

El muestreo de los 15 perfiles de suelos se llevó a cabo a lo largo de una toposecuencia considerando su relieve y geología. La toposecuencia se realizó en todo el Valle del Monzón, usando un GPS para realizar la marca correspondiente en cada punto de excavación. Seguido de eso, se realizaron las calicatas, se excavaron con la profundidad recomendada (150 cm a 180 cm), sin embargo, en algunos puntos de muestreo la napa freática estaba muy cercana a la superficie, lo que obligó a extraer muestras de los horizontes del perfil del suelo hasta el límite que determinó el acuífero. Se obtuvieron un total de 81 muestras concernientes a los horizontes. Asimismo, se determinaron los atributos de densidad en cada horizonte mediante el método del anillo volumétrico. Para los atributos de carbono orgánico total (COT), pH, Al y capacidad de intercambio catiónico (CIC), cada muestra de suelo fue secada al aire, desmenuzadas y cernidas por una malla de 2 mm, para la obtención de tierra fina secada al aire (TFSA).

Atributos del suelo

Algunos de los atributos fueron evaluados in-situ, como es el caso del color en los perfiles estudiados, estos fueron descritos conforme al sistema de la tabla Munsell (Barrón et al., 2000). Las muestras de TFSA fueron enviadas a laboratorio para los análisis siguientes: pH (1:1), CIC según el método de acetato de amonio 1N pH 7 (Rhoades, 1982), calcio, magnesio, potasio y sodio intercambiable, la lectura de las muestras fue por espectrofotómetro de absorción atómica (Jackson, 1964), el aluminio por el método de Yuan (1958) y El COT mediante el método de Raji et al. (1997). El stock de carbono en cada perfil de suelo evaluado fue estimado por la siguiente fórmula (Freixos et al., 2002):

$$[\text{Stock de carbono} = (\text{COT} \times \text{Da} \times e) 10]$$

Siendo: Stock de carbono = stock de carbono orgánico en el horizonte evaluado (Mg/ha); COT = carbono orgánico total (g/kg); Da = densidad de suelo del horizonte evaluado; e = profundidad del horizonte analizado (cm).

Mediciones de isótopos estables

Las muestras de suelo fueron pesadas previo a su análisis debido a que el equipamiento es sumamente sensible (Mettler Toledo XP6), para lo cual el procedimiento utilizado se describe a continuación: se escogieron muestras con una profundidad superficial, media y profunda, con codificación de acuerdo a su perfil y horizonte (Tabla 1), seguidamente se realizó el proceso de prueba simple con la finalidad de determinar el carbono y la masa. Se

eligieron tres muestras de suelo pertenecientes a estas codificaciones (M4Ap, M5Bw2 y M12BC) ejemplo: donde M5 es el perfil 5 con un horizonte Bw2. Estas muestras provienen de las respectivas profundidades (0 a 5, 20 a 40 y 70 a 100 cm). En base a las tres muestras mencionadas se tuvo en cuenta la profundidad de cada muestra para pesar la masa suficiente con la finalidad de obtener resultados correctos, por lo cual se utilizó entre 500 a 600 µg de suelo para muestras < 40 cm de profundidad, en el caso que las muestras superan profundidades de 40 cm, se utilizó entre 1500 a 2000 µg, según el criterio de Coplen (2011). Se usó el equipamiento Flash 2000 EA vinculado a Delta V Plus IRMS. El sistema determinó simultáneamente las relaciones isotópicas R(iE/jE) muestra, que se expresaron como una diferencia relativa en la relación isotópica δiE, en ‰, de acuerdo con la ecuación.

$$\delta^i E_{(‰)} = \frac{R\left(\frac{iE}{jE}\right)_{sample}}{R\left(\frac{iE}{jE}\right)_{standard}} - 1$$

Donde iE es el isótopo raro, jE el isótopo abundante y R(iE/jE) estándar son las relaciones estándar internacionales VPDB y Ar a R (13C/12C) VPDB. Los resultados se normalizaron a partir de los estándares de referencia certificados USGS 61, USGS 62, USGS 63, USGS 90 y USGS 91 (Paul et al., 2007; Schimmelmann et al., 2016, 2020). La incertidumbre estándar del análisis se estimó en ±0,10‰ para δ13C. Las comparaciones entre curvas dieron como resultado que M12BC tiene una curva muy poco visible, lo que significa que necesitan más masa para que el equipamiento pueda encontrar carbono.

Análisis estadístico

Los análisis de componentes principales (PCA) se graficaron a través de un biplot de dos componentes usando el paquete factextra v1.0.7. Previamente, y usando dplyr v1.1.4, se importó el data frame y se filtraron solo las variables numéricas (sin valores perdidos). Luego, cada variable se estandarizó a media cero y desviación estándar uno mediante purrr v1.0.4 y la función scale. Los diagramas de dispersión de δ13C frente a profundidad con tres secciones separadas de plantas C3, C4 y C3/C4 se generaron usando la función ggplot y el parámetro facet_wrap del paquete ggplot2 v3.5.2. Los modelos de regresión lineal se ajustaron empleando los paquetes ggplot2 v3.5.2 y ggpmisc v0.6.1, personalizándose para mostrar la ecuación de regresión lineal y los valores de R². Todos estos paquetes se corrieron en el lenguaje de programación R v4.3.1 en el entorno RStudio v2023.06.1.

Tabla 1

Datos de altitud, orden, horizontes, color, profundidad, COT, stock de carbono, pH, Al, CIC y cultivo de los perfiles estudiados

Perfil/Altitud	Orden	Horizontes	Color	Profundidad	COT (g/kg)	Stock de carbono (Mg/ha)	pH	Al	CIC	Cultivo
M01/675	Entisols	Ap	5Y 2.5/2	0 - 10 cm	15,33	20,70	6,14	0,50	7,89	Yuca
		C ₁	5Y 3/2	10 - 18 cm	6,99	9,39	6,01	0,30	6,93	
		2C	5Y 3/2	18 - 25 cm	7,70	6,90	6,01	0,10	6,75	
		3C	5Y 2.5/2	25 - 30 cm	6,99	4,82	5,38	0,09	6,03	
		4C	5Y 3/2	30 - 40 cm	5,29	8,04	5,76	0,10	6,53	
		5C	5Y 4/2	40 - 60 cm	5,01	16,93	6,63	0,10	6,85	
M02/706	Inceptisols	Ap	10YR 3/4	0 - 20 cm	76,73	204,10	4,46	7,50	11,20	Hierbas
		A2	10YR 2/2	20 - 33 cm	66,26	115,43	4,76	8,10	11,21	
		AB	10YR 2/2	33 - 50 cm	49,85	111,87	4,70	7,30	10,29	
		Bw	10YR 6/8	50 - 90 cm	17,88	87,98	4,60	9,20	12,51	
		BC	10YR 6/8	90 - 140 cm	14,34	73,16	4,62	8,60	11,60	
		C	7.5YR 5/8	140 - 175 cm	8,69	30,71	4,61	7,10	10,07	
M03/698	Entisols	Ap	7.5YR 2.5/3	0 - 13 cm	30,19	49,06	4,81	1,30	7,51	Cacao
		AC	7.5YR 3/3	13 - 30 cm	33,30	69,07	4,78	1,56	7,05	
		C ₁	5Y 4/2	30 - 58 cm	31,74	152,88	4,80	1,00	6,99	
		C ₂	5Y 3/2	58 - 68 cm	22,69	36,53	5,49	0,98	6,82	
		2C	5Y 4/3	68 - 80 cm	4,87	5,96	5,61	0,87	7,09	
M04/750	Inceptisols	Ap	5Y 3/4	0 - 5 cm	87,76	53,54	4,44	6,80	9,89	Coca
		Bw1	5Y 4/4	5 - 20 cm	55,65	85,15	4,56	4,80	9,15	
		Bw2	5Y 4/4	20 - 40 cm	31,74	64,12	4,42	4,70	7,06	
		Bw3	5Y 4/4	40 - 60 cm	24,39	51,22	4,27	3,70	5,49	
		Bw4	5Y 4/4	60 - 110 cm	8,26	45,44	4,79	3,70	6,79	
		Bw5	5Y 4/4	110 - 125 cm	7,84	12,58	4,81	3,90	5,69	
		BC	5Y 4/4	125 a +	7,27	20,36	4,92	3,60	6,42	
M05/732	Inceptisols	A	7.5YR 2.5/3	0 - 5 cm	72,06	48,64	4,66	3,50	8,15	Coca
		Bw1	7.5YR 3/4	5 - 20 cm	38,39	69,68	4,28	4,20	9,09	
		Bw2	7.5YR 4/4	20 - 40 cm	37,12	91,32	4,43	3,60	8,19	
		BC	7.5YR 3/4	40 - 60 cm	17,03	34,75	4,39	4,10	8,32	
		C	5YR 3/3	60 - 110 cm	7,98	41,09	4,78	3,30	8,55	
M06/707	Inceptisols	A	7.5YR 2.5/2	0 - 20 cm	71,21	192,27	5,20	3,80	10,43	Cacao
		Bw1	7.5YR 4/4	20 - 30 cm	24,81	30,77	4,56	4,20	10,00	
		2C1	7.5YR 4/6	30 - 45 cm	13,92	21,30	4,58	4,50	9,80	
		3C2	7.5YR 4/6	45 - 70 cm	7,70	19,82	4,56	5,20	9,82	
		4Cg	7.5YR 5/6	70 - 90 cm	6,42	13,36	5,05	3,50	9,09	
		5Cg	7.5YR 5/6	90 a +	11,37	35,83	4,68	6,30	11,25	
M07/734	Alfisols	A	5YR 3/3	0 - 12 cm	92,15	133,80	5,86	2,30	8,18	Purma baja
		Bw	5YR 3/4	12 - 25 cm	46,74	74,74	5,65	2,20	7,90	
		Bw ₂	2.5YR 2.5/4	25 - 38 cm	21,13	28,02	5,50	2,50	8,07	
		BC	2.5YR 4/6	38 - 60 cm	14,77	33,47	5,68	2,10	7,72	
		C	2.5YR 3/6	60 - 110 cm	14,63	76,06	5,48	1,50	6,97	

M08/718	Entisols	Ap	5Y 4/2	0 - 8 cm	9,25	9,99	6,32	0,00	7,00	Maíz
		C ₁	5Y 3/2	8 - 16 cm	6,56	7,67	6,48	0,00	6,35	
		C ₂	5Y 4/2	16 - 30 cm	5,72	10,72	6,79	0,00	6,15	
		2C	5Y 4/1	30 - 55 cm	67,68	230,10	5,85	0,06	6,30	
		2C ₂	5Y 5/1	55 - 80 cm	20,99	77,68	5,94	0,04	5,95	
		3C	5Y 3/2	80 - 100 cm	4,02	12,78	6,20	0,04	5,87	
M09/740	Inceptisols	Ap	10Y 3/4	0 - 20 cm	88,75	218,34	4,68	3,20	7,51	Cacao
		Bw	10Y 6/8	20 - 40 cm	19,72	40,23	4,79	2,90	7,18	
		C	10Y 6/8	40 a +	12,22	30,56	4,67	3,50	7,12	
M10/769	Inceptisols	A	7.5YR 4/4	0 - 10 cm	52,26	63,75	3,57	2,22	5,70	Coca
		Bw1	5YR 5/6	10 - 40 cm	17,88	56,33	3,67	2,15	5,45	
		Bw2	5YR 5/8	40 - 70 cm	33,73	108,26	3,82	1,85	5,32	
		BC	5YR 5/8	70 a +	13,78	90,25	4,02	1,20	5,46	
M11/753	Entisols	A	10YR 3/3	0 - 20 cm	80,69	217,87	4,90	0,90	5,70	Yuca
		C1	10YR 5/4	20 - 40 cm	49,99	164,98	5,12	0,42	5,51	
		C2	2.5Y 5/4	40 - 70 cm	37,97	189,09	5,23	0,38	5,50	
		2C	5Y 2.5/1	70 a +	64,42	332,42	4,78	0,92	5,05	
M12/734	Inceptisols	A	10YR 5/4	0 - 15 cm	81,68	153,15	4,26	2,33	5,98	Pastos
		Bw1	10YR 7/6	15 - 30 cm	20,14	32,63	4,16	2,41	5,66	
		Bw2	10YR 7/4	30 - 50 cm	10,38	27,21	4,85	1,39	5,80	
		Bw3	10YR 7/6	50 - 70 cm	2,60	6,92	4,72	0,89	5,45	
		Bw4	10YR 6/4	70 - 100 cm	4,44	17,99	4,75	0,88	5,33	
		BC	10YR 7/2	100 - 120 cm	1,47	20,01	4,77	0,78	5,67	
M13/720	Inceptisols	A	5YR 4/6	0 - 8 cm	84,79	82,08	4,48	3,21	5,20	Purma secundaria
		Bw1	5YR 5/8	8 - 20 cm	24,67	11,15	4,38	2,72	4,58	
		Bw2	5YR 5/8	20 - 40 cm	17,17	38,13	4,58	2,35	4,35	
		Bw3	5YR 5/8	40 - 60 cm	10,95	24,53	5,04	2,22	4,21	
		BC	5YR 5/8	60 - 90 cm	12,51	42,39	4,86	1,98	3,62	
		C	5YR 5/8	90 a +	11,23	48,07	4,83	1,93	3,16	
M14/765	Entisols	A	10YR 3/3	0 - 35 cm	82,11	416,69	5,56	0,00	7,45	Cacao
		C1	10YR 3/6	35 - 60 cm	35,28	145,53	4,88	0,00	7,20	
		C2	10YR 4/6	60 - 80 cm	21,84	59,85	4,69	0,18	5,34	
		C3	10YR 5/6	80 - 100 cm	13,78	37,20	4,57	0,38	5,19	
		C4	10YR 5/6	100 - 110 cm	7,27	10,03	4,64	0,00	5,07	
		C5	10YR 5/6	110 a +	3,45	14,08	4,35	0,22	4,99	
M15/975	Inceptisols	A	10YR 3/4	0 - 25 cm	93,71	295,30	4,86	7,23	11,64	Purma secundaria
		Bw1	10YR 3/6	25 - 40 cm	89,46	165,06	4,15	11,10	14,55	
		Bw2	10YR 3/6	40 - 55 cm	63,43	115,13	4,45	8,09	11,85	
		Bw3	7.5YR 5/8	55 - 80 cm	28,07	77,18	4,28	7,11	10,15	
		Bw4	7.5YR 5/8	80 - 110 cm	13,92	45,52	4,69	7,00	10,11	
		BC	7.5YR 5/8	110 a +	9,25	27,76	4,77	6,78	9,70	

3. Resultados y discusión

En la **Tabla 1** se observa que los Entisols de las áreas estudiadas presentan características poco desarrolladas, poca materia orgánica y probablemente estas características se deban a suelos en constantes cambios ya que se localizan en zona de erosión y cercanas a las riberas de los ríos. Para las características de los Inceptisols, se obtuvo que, la CIC es de media a baja. Por último, los Alfisols presentaron características como dominancia de óxidos de Fe y Al por el color rojizo observado, y es un suelo bien desarrollado.

Los horizontes superficiales de los perfiles tienden a tener más contenido de COT, que en caso de los Inceptisols y Entisols está dentro de un promedio de profundidad de los 20 a 30 cm, y el Alfisols entre 0 a 25 cm (**Tabla 1**). Resultados de tendencia diferente fueron encontrados por **Carvajal et al. (2009)** al observar en perfiles de 0 a 30 cm donde hubo incrementos de carbono en relictos de selva, es decir estos suelos aumentaron su cantidad cuando pasaron a tener la presencia de cultivos de café y plátano.

El stock de carbono tuvo variaciones notables de una profundidad a otra, en el perfil M01, el cual es un Entisols se ha obtenido los resultados más altos de stock de carbono en la superficie de 0 a 10 cm con 20,70 Mg/ha. Y en caso de los Inceptisols, se ha encontrado que los valores bajan gradualmente con la profundidad, sin embargo, también se encuentra datos como el del perfil M05, que de 0 a 5 cm hay 4,64 Mg/ha y aumenta gradualmente de 20 a 40 cm con 91,32 Mg/ha para luego volver a disminuir. Por su parte, el Alfisol tiene su valor más alto de stock de carbono en la superficie de 0 a 12 cm con 133,8 Mg/ha, y su valor más bajo de 25 a 38 cm con 28,02 Mg/ha.

Tal como se muestran en los resultados anteriores la mayor parte de stock de carbono se encuentra en la parte superficial del suelo, lo que concuerda con el estudio realizado por **Vargas et al. (2023)**, donde resultó que la proporción de carbono más baja se encontró en la capa de suelo de 30 a 60 cm, el stock de carbono fue altamente variable y se presentó en un rango de 12,3 a 467,5 Mg/ha en los primeros 30 cm de profundidad, y de 1,9 a 254,1 Mg/ha de los 30 a 60 cm. Alrededor de 70 % del stock de carbono se almacena en los primeros 30 cm de profundidad. Y de acuerdo con el estudio realizado por **Paz & Etchevers (2016)**, el COT en los primeros 30 cm de profundidad, con relación al primer metro, representa alrededor de 50%. El perfil M15 tiene el COT más abundante, con un valor de 93,71 g/kg, el cual está a una profundidad de 0 a 25

cm, siendo este un Inceptisols. En el M14 se encontró el valor 3,45 g/kg de COT a una profundidad de 110 cm a más, siendo este el valor más bajo de los perfiles evaluados.

En cuanto a los valores de pH, se observó que las muestras de suelos Entisols muestran valores menos ácidos a comparación de los Inceptisols, como en el perfil M08 que a una profundidad de 16 a 30 cm se observó que tiene un pH de 6,79 el menos ácido de todas las muestras, de forma contraria pasa en el perfil M10 el cual tiene el valor más ácido de todas las muestras, con un valor de 3,57 con una profundidad de 0 a 10 cm. El perfil M07 presentó valores de pH de 5,48 a 5,86, niveles considerables para la disponibilidad de nutrientes. El perfil M15 presentó mayor CIC con un valor de 14,55 a una profundidad de 25 a 40 cm y M02Bw tiene el valor más alto de Al con 9,20. M13C tiene 3,16 de CIC, siendo el más bajo de todos. M08Ap, C₁ y C₂; M14A, C₁ y C₄ presentan el valor de 0,00, el más bajo de Al (**López et al., 2019; Cruz et al., 2020**).

En la **Figura 2** se visualiza el análisis isotópico de $\delta^{13}\text{C}$ en base a los perfiles estudiados, ante los resultados se observan rangos de porcentajes que serán contrastados en base a los criterios de **Salazar & Silva (2017)** donde manifiestan que las plantas con distintas rutas fotosintéticas (C₃ y C₄) para $\delta^{13}\text{C}$ oscilan entre: C₃ (-35 a -20 ‰) y C₄ (-19 a -7,5 ‰).

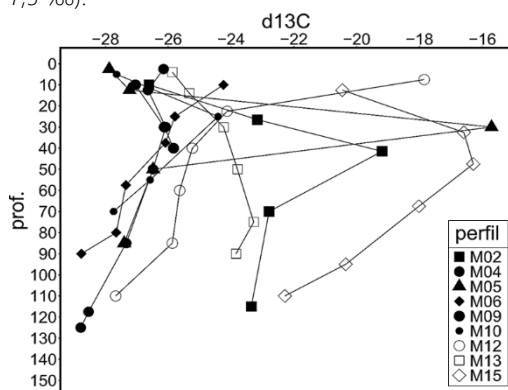


Figura 2. Abundancia natural de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) en los perfiles Inceptisols (perfiles M02, M04, M05, M06, M09, M10, M12, M13, M15).

En los Inceptisols (perfiles M02, M04, M05, M06, M09, M10, M12, M13 y M15), se verifica una variación en los niveles isotópicos, algunas más bruscas que otras. En los perfiles M04, M06, M09, M10 y M13 se observa predominancia total de carbono provenientes de plantas C₃, probablemente esto se deba a que existió una pequeña interferencia antrópica en dichos perfiles lo que conlleva a favorecer al COT (**Dortzbach et al., 2016**). En cambio, los perfiles M02, M05, M12 y M15, muestran una mezcla de carbono C₃ y C₄, identificando que en sus

profundidades 40 - 50 cm, 20 - 40 cm, 0 - 10 cm y 30 - 70 cm respectivamente se evidencia carbono proveniente de plantas C4. Lo que conforme con **Dortzbach et al. (2016)** esto puede ser debido a que dichas zonas pudieron haber sido enriquecidos por gramíneas, lo que demuestra que el uso pudo haber favorecido a la estabilidad de materia orgánica en esos puntos y también un cambio por actividad antropogénica marcada.

En M01, M03, M08, M11 y M14 clasificados como Entisols y con menor formación de un horizonte de diagnóstico, se observa que tienen resultados diferentes que los verificados en los perfiles Inceptisols (**Figura 3**). Se observó que a lo largo de todas las profundidades hay carbono proveniente de plantas C3, el cambio brusco del perfil M03 en su punto superficial de 0 a 20 cm al punto con una profundidad de 60 a 70 cm, sugiere una mayor captación de carbono, que pudo haberse debido a la cantidad de materia orgánica en descomposición en el suelo en ese periodo.

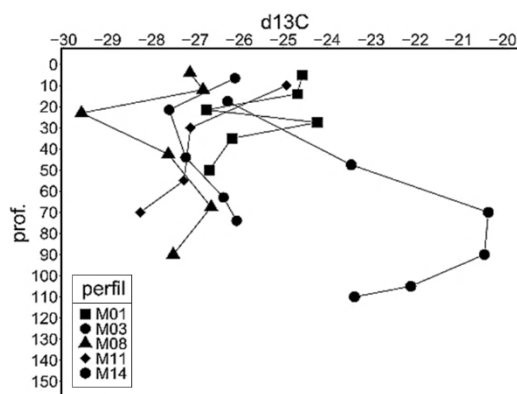


Figura 3. Abundancia natural de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) en los perfiles Entisols (perfiles M01, M03, M08, M11 y M14).

En este único perfil M07 (**Figura 4**), clasificado como Alfisol, se ha observado que los resultados muestran carbono proveniente de plantas C3 en su totalidad. Con una mayor captación de carbono del punto superficial de 0 a 10 cm, al punto más cercano al cero de 10 a 20 cm, con valores de entre -29,2 a 29,0 y -26,2 a -26,0 respectivamente.

Conforme con **Salazar & Silva (2017)**, las plantas C3 son mucho más empobrecidas de $\delta^{13}\text{C}$ que las plantas C4, por causa a la acumulación de materia orgánica, influenciada por la descomposición de plantas, la actividad microbiana, cambios en la vegetación, uso de fertilizantes, factores climáticos y la deposición de sedimentos aluviales.

Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ bajo los cultivos actuales encontrados en cada perfil de suelo, bajo sistemas de plantas C3, C4 y mixtas, muestran que van desde

-33 ‰ bajo vegetación C3, hasta -13 ‰ bajo vegetación C4 (**Figura 5**). En el grupo representado por plantas C3/C4, en general los valores tendieron a disminuir a medida que la profundidad era más superficial, encontrando la mayoría de los puntos dentro de los 50 cm o menos, así inclinándose más por el carbono proveniente de plantas C3, puesto que los valores de esta mayoría son más negativos que -20 ‰. Valores menores -20 ‰ corresponden a C3, lo que sugiere que no hay relación con el cultivo predominante actual. Sin embargo, en los valores obtenidos donde actualmente se practica el uso del suelo con plantas C3 tiene una relación con la mayoría de los datos de $\delta^{13}\text{C}$, encontrando así puntos referidos dentro de los 0 a 100 cm de profundidad, de valores entre -21 a -29 ‰.

Ahora, la minoría de puntos encontrados bajo los tres sistemas de uso C3, C4 y C3/C4, los cuales tienen valores mayores a -21 ‰, sugieren que a profundidades de entre 0 a 75 cm hubo actividad antropogénica con plantas C4, tal vez en su mayoría gramíneas que son plantas que dan como resultados carbonos de C4. **Razanamahandry et al. (2022)** indica que, si la vegetación C4 hubiera sido dominante durante mucho tiempo, esperando que el $\delta^{13}\text{C}$ en la capa superior del suelo estuviera entre -19 y -7,5 ‰, con poca variación con la profundidad como se observa en los pocos estudios que documentan perfiles de $\delta^{13}\text{C}$ del suelo bajo vegetación C4 a largo plazo como el de **Conrad et al. (2017)**. Asimismo, estos autores verificaron que algunos perfiles con gramíneas tienen valores de $\delta^{13}\text{C}$ en la capa superior que son consistentes con la actual vegetación C4, la mayoría de las muestras de suelo superficial muestran un valor de $\delta^{13}\text{C}$ más bajo de lo que se esperaría para vegetación C4. Esto sugiere que, incluso en la capa superior, la fuente deriva de la vegetación C3.

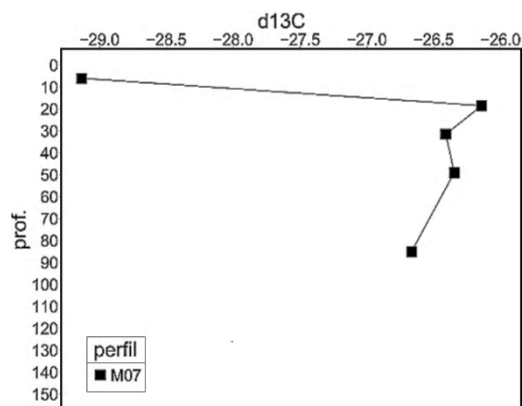


Figura 4. Abundancia natural de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) en los perfiles Entisols (perfil M07).

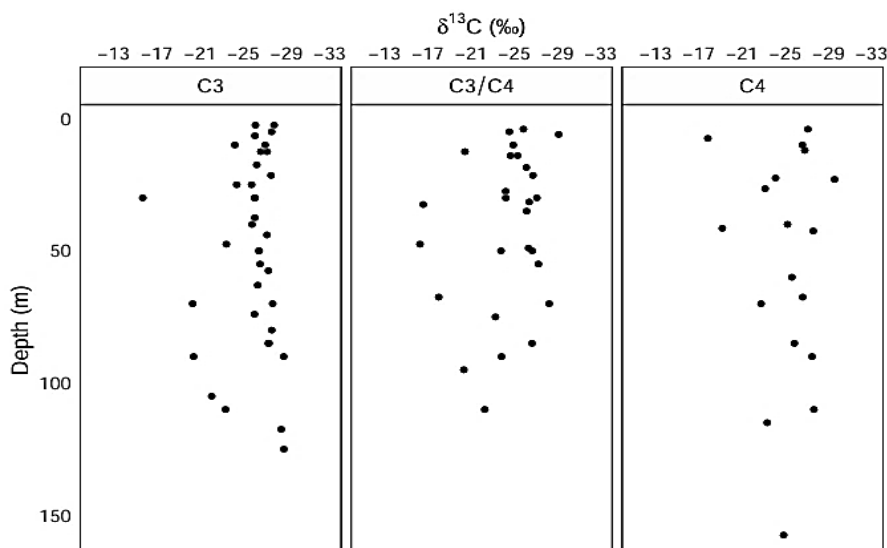


Figura 5. Composición isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ bajo sistemas vegetales C3, C3/C4 y C4.

Por medio del análisis biplot bidimensional ACP realizado en los 15 perfiles, se verificó que el modelo explica más del 75 % de los resultados encontrados (Figura 6). En los perfiles a, e, f y n el $\delta^{13}\text{C}$ no tiene relación con ningún otro componente. En los perfiles b, h, i, j, k y o se observó que la correlación entre $\delta^{13}\text{C}$ y Al es aproximada.

Dentro de todos los perfiles se ha verificado que las mayores correlaciones de $\delta^{13}\text{C}$ con alguna otra variable han sido en el d, que tiene correlación positiva con stock de carbono, donde la Dim 1 explica el 85 % de la información y i tiene una correlación positiva con la profundidad, donde la Dim 1 explica el 99 % de la información. El perfil l tiene correlación positiva con las variables COT y stock de carbono, donde la Dim 1 explica el 84% de la información. En m encontramos una correlación negativa entre pH y profundidad, los cuales también tiene mayor correlación entre ellas que con el $\delta^{13}\text{C}$, información explicada al 81% por la Dim 1. Finalmente, en el perfil o se observó que el $\delta^{13}\text{C}$ tiene correlación positiva con Al y CIC, la información fue explicada por la Dim 1 al 79% (Dortzbach et al., 2015).

La mayor parte de la variación de los datos es explicada por la Dim 1 y Dim 2 cuyo menor valor fue observado en el perfil a, explicando el 81,6 % de la información, pero llegando al 100% de toda la variación en el perfil i (Figura 6). La variación con respecto a la altitud está alejada de las demás variables, ubicada siempre en el centro (Figura 6), como si fuera independiente, pudiéndose afirmar que no tiene correlación con ningún otro atributo. Por la dispersión de los datos en el gráfico se verificó que no todos los perfiles muestran una fuerte

correlación entre los componentes COT y stock de carbono, lo que difiere con los datos obtenidos por Dortzbach et al. (2015), donde afirman en su investigación que, las variables COT y stock de carbono están fuertemente correlacionadas entre sí en todas las capas evaluadas, pero son independientes a la Da.

En la Figura 7 se observan correlaciones fuertes y positivas entre COT y stock de carbono, y entre Al y CIC, las demás correlaciones fueron bajas y/o negativas. La correlación de Pearson mostró que estas correlaciones fueron las más altas de todas con un valor de 0,768 y 0,820, respectivamente. Ouyang et al. (2023) indican que el Al compite con otros cationes, reduciendo la CIC para retener y liberar nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas y que el stock de carbono es el resultado de la integración del COT en un volumen o área específica.

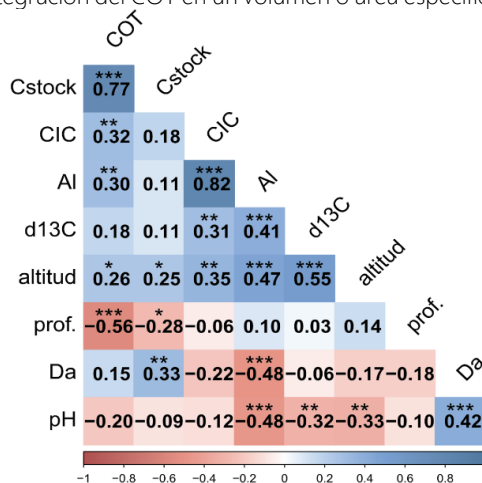


Figura 7. Correlación de Pearson entre las variables COT, stock de carbono, densidad aparente (Da), pH, CIC, $\delta^{13}\text{C}$, altitud, Al y profundidad.

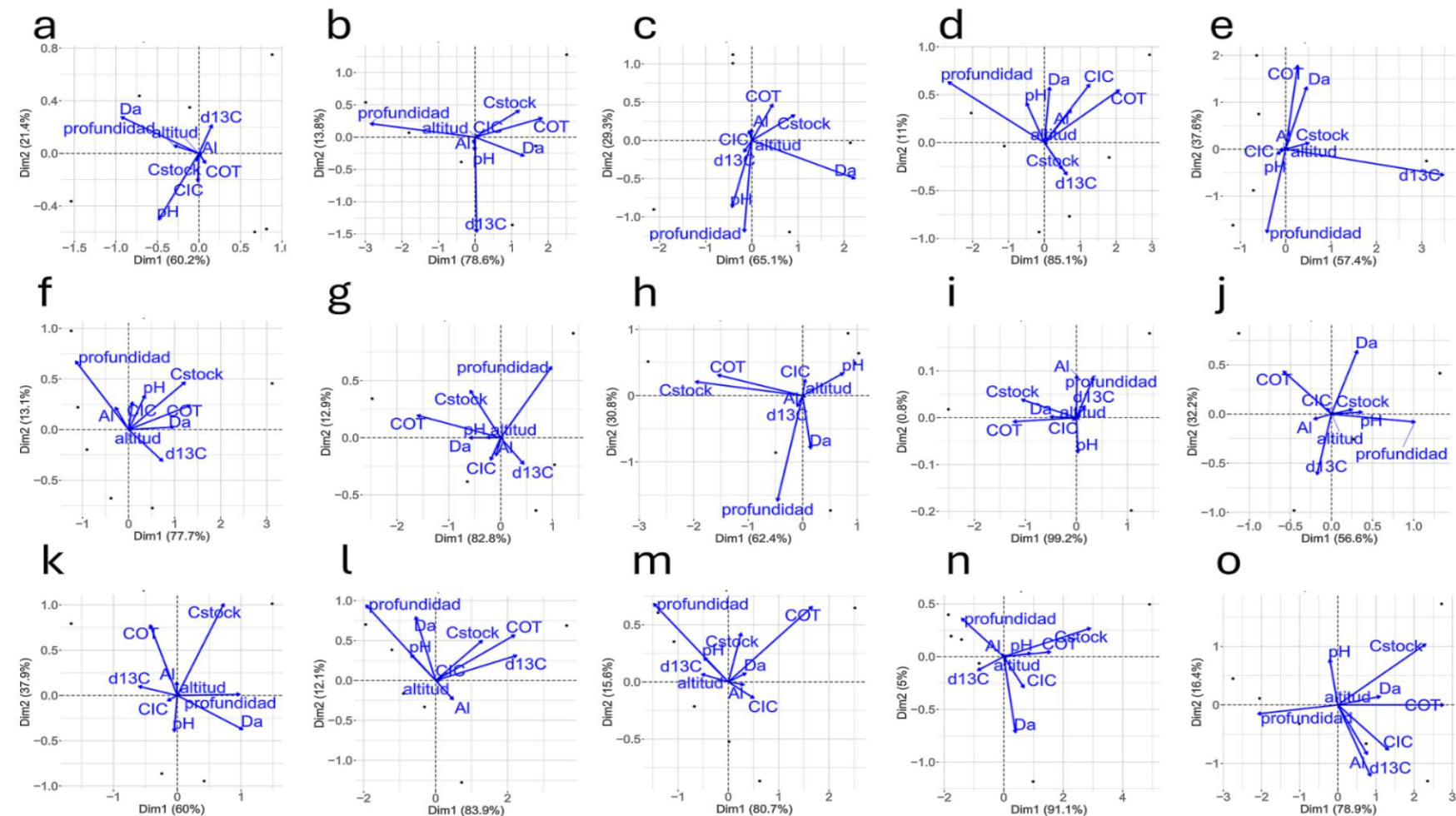


Figura 6. Análisis de Componentes Principales (ACP) biplot mostrando la relación entre propiedades del suelo y los perfiles estudiados. Los vectores representan las variables: Carbono Orgánico Total (COT), stock de carbono (C), profundidad, altitud, pH, aluminio (Al), Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), densidad aparente (Da) y $\delta^{13}C$. Los puntos corresponden a los perfiles, clasificados por orden: Entisols (a, c, h, k, n), Inceptisols (b, d, e, i, j, l, m, o) y Alfisols (g).

4. Conclusiones

Se pudieron encontrar diferencias entre los perfiles estudiados, así mismo existe una variación cuantitativa de horizontes, debido a la presencia de la napa freática a pocas profundidades; determinándose tres órdenes (Inceptisols, Entisols y Alfisols). De manera general los parámetros de pH en los suelos presentan acidez, los horizontes muestran marcadas diferencias en base de algunos parámetros. Los Inceptisols poseen entre media a baja CIC, en Alfisols existe predominancias de color rojizo; ya los resultados de COT y stock de carbono tuvieron supremacía para los Entisols e Inceptisols.

El $\delta^{13}C$ en base a los órdenes, se evidencia que en caso de los Inceptisols existen mezclas de cultivos provenientes de plantas C3 y C4, probablemente esto se deba en base al tiempo ciertas profundidades a nivel histórico presentaron interferencias antrópicas. En caso de los Entisols, existe una carencia de formación de horizonte de diagnóstico, verificándose que en base a las profundidades hay predominancia de carbono provenientes de plantas C3. En el Alfisol presentó mayor captación de carbono específicamente de plantas C3 en el horizonte superficial.

La composición isotópica de $\delta^{13}C$ bajo sistemas vegetales C3, C3/C4 y C4 en base a los horizontes de estudio, para la vegetación C3/C4 de manera general los resultados disminuyen en razón a la profundidad, inclinándose más por la C3 en el rango dentro de los 50 cm o menos. Para la C4 fueron inferiores a -20 ‰ entre 0 a 100 cm cuyos valores pertenecientes a plantas C3. En la C3 la mayoría de los datos se encuentran de 0 a 100 cm, los cuales pertenecen a carbono de plantas C3.

En el ACP no se encontró correlación del $\delta^{13}C$ con otro atributo de estudio, específicamente para los perfiles M01, M05, M06 y M14. En el perfil M04 con relación a los otros perfiles se verificó que tiene alta correlación de $\delta^{13}C$ con el stock de carbono, el M13 presentó correlación negativa entre el pH y la profundidad, sin embargo, existe una mayor correlación entre ellas con el $\delta^{13}C$. Correlaciones positivas con las variables de COT y stock de carbono fueron encontradas en el M12. Además de ampliar los estudios con el $\delta^{13}C$, es necesario impulsar investigaciones futuras que profundicen en el análisis del $\delta^{15}N$ y empleen metodologías complementarias, con el fin de ampliar y dar continuidad a este estudio.

Agradecimiento

Este trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (CONCYTEC) a través del Programa Nacional de Investigación Científica y Estudios Avanzados (PROCIENCIA), según contrato PE501083222-2023-PROCIENCIA.

Contribución de los autores

N. S. Torres-Upiachihua: Conceptualización, investigación, metodología, validación, visualización, redacción-borrador original. **R. F. Lagos-Damas:** Investigación. **L. Toribio-Dueñas:** Investigación. **J. A. Chia-Wong:** Curación de datos, investigación, visualización, redacción-revisión y edición. **V. Eliodoro-Costa:** Investigación, metodología, visualización, redacción-revisión y edición. **L. Navarro-Vásquez:** Investigación, supervisión, redacción-revisión y edición.

ORCID

N. S. Torres-Upiachihua  <https://orcid.org/0009-0006-5097-9917>
 R. F. Lagos-Damas  <https://orcid.org/0009-0007-9146-4255>
 L. Toribio-Dueñas  <https://orcid.org/0009-0001-1485-8628>
 J. A. Chia-Wong  <https://orcid.org/0000-0002-0947-9949>
 V. Eliodoro-Costa  <https://orcid.org/0000-0003-3889-7514>
 L. Navarro-Vásquez  <https://orcid.org/0000-0003-0147-362X>

Referencias bibliográficas

- Barrezueta, S., Paz, A., Luna, Á., & Jaramillo, E. (2019). Variabilidad de $\delta^{13}C$ y $\delta^{15}N$ en suelo y hojarasca de cacao en El Oro, Ecuador. *Terra Latinoamericana*, 37(2), 131-140. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.202>
- Barrón, V., Mello, J., & Torrent, J. (2000). Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de reflectância difusa. In: Novais, R.F., Alvarez, V., V. H., Schaefer, C.E.G.R.(Eds.), *Tópicos em ciência do solo* (pp. 139-162). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Berriell, V., Mori, C., & Perdomo, C. (2014). Estatus hídrico y discriminación isotópica de ^{13}C de dos pasturas convencionales de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 18(2), 1-13. <https://doi.org/10.31285/agro.21.365>
- Carrión, M., Espinoza F., Barrial A., & Ponce, Y. (2021). Influence of altitude and soil characteristics on organic carbon storage capacity of high Andean natural pastures. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 83-90.
- Carvajal, A., Feijoo, A., Quintero, H., & Rondón, M. (2009). Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. *Ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 9(3), 222 - 235. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912009000300005>
- Conrad, K., Dalal, R., Dalzell, S. Allen D., & Menzies, N. (2017). The sequestration and turnover of soil organic carbon in subtropical leucaena-grass pastures. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 248, 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.020>
- Contreras, J. (2021). *Efecto de la aplicación de enmiendas cálcicas en las propiedades físicas, químicas y biológicas de suelos ácidos en Satipo (Tesis de pregrado)*. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Coplen, T. (2011). Guidelines and recommended terms for expression of stable-isotope-ratio and gas-ratio measurement results. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 25, 2538-2560. <https://doi.org/10.1002/rcm.5129>
- Cruz, W., Rodríguez, L., Salas, M., Hernández, V., Campos, R., Chávez, M., & Gordillo, A. (2020). Efecto de la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico sobre la acidez de suelos cultivados con maíz en dos regiones de Chiapas, México. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 475-480. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.506>
- Dortzbach, D., Gervasio, M., Blainski, É., & Paz, A. (2015). Estoque de C e Abundância Natural de ^{13}C em Razão da Conversão de Áreas de Floresta e Pastagem em Bioma Mata Atlântica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39(6), 1643-1660. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140531>
- Dortzbach, D., Gervasio, M., Novaes, L., & Paz, A. (2016). Horizontes diagnósticos superficiais de Cambissolos e uso de

- $\delta^{13}\text{C}$ como atributo complementar na classificação de solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 57(9), 1339-1348. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900033>
- Freixo, A., Machado, P., Guimarães, C., Silva, C., & Fadigas, F. (2002). Estoque de carbono e nitrogênio e distribuição de frações orgânicas de Latossolo do Cerrado sob diferentes sistemas de cultivo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26, 425-434. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012005000008>
- Fuchs, M., Cocilovo, J., & Varela, H. (2015). Análisis de la peledieta a partir de los isótopos estables del carbono y del nitrógeno en la población prehispánica de la puna de Jujuy (Argentina). *Estudios atacameños*, 51, 123-135. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-10432015000200008>
- Gao, H., Gong, J., Liu, J., & Teng, Y. (2024). Effects of land use/cover changes on soil organic carbon stocks in Qinghai-Tibet Plateau: A comparative analysis of different ecological functional areas based on machine learning methods and soil carbon pool data. *Journal of Cleaner Production*, 434, Article 139854. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139854>
- Gutiérrez, S., Jiménez, P., Guiomar, N., Caldeira, A., & Miller, A. (2024). Influencia de los incendios forestales en las comunidades microbianas y la calidad de la materia orgánica del suelo. XI Congreso Internacional FuegoRED, Salamanca.
- Jackson, M. (1964). Análisis químico de suelos, primera edición. Omega, Barcelona. 662p.
- Krüger, N., Finn, D. R., & Don, A. (2024). Soil depth gradients of organic carbon-13 – A review on drivers and processes. *Plant and Soil*, 495(1-2), 113-136. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06328-5>
- López, W., Reynoso, R., López, J., Villar, B., Camas, R., & García, J. (2019). Caracterización físico-química de suelos cultivados con maíz en Villaflores, Chiapas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(4), 897-910. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1764>
- Martínez, A., Galarza, R., Intrigliolo, D., Martín, D., & Gonzaga, L. (2018). El ratio isotópico de carbono en viticultura: fundamentos de la técnica y utilidades. *Enología y viticultura*, 2, 20-25.
- Neaman, A. (2024). Aspectos metodológicos para la investigación sobre el comportamiento de conservación de suelos. *Idesia (Arica)*, 42(4), 86-94. <https://dx.doi.org/10.4067/s0718-34292024000400086>
- Ouyang, N., Zhang, P., Zhang, Y., Sheng, H., Zhou, Q., Huang, Y., & Yu, Z. (2023). Cation Exchange Properties of Subsurface Soil in Mid-Subtropical China: Variations, Correlation with Soil-Forming Factors, and Prediction. *Agronomy*, 13(3), 741. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030741>
- Paul, D., Skrzypek, G., & Fórizs, I. (2007). Normalization of measured stable isotopic compositions to isotope reference scales – a review. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 21(18), 3006–3014. <https://doi.org/10.1002/rcm.3185>
- Paz, F., & Etchevers, J. (2016). Distribución a profundidad del carbono orgánico en los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 339-355.
- Raij, B., Cantarella, H., Quaggio, J., & Furlani, A. (1997). Recomendaciones de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2.ed. Campinas, Brasil. Instituto Agronômico/Fundação IAC, 285p. (Boletim Técnico 100).
- Razanamahandry, V., Dewaele, M., Govers, G., Brosens, L., Campforts, B., Jacobs, L., Razafimbelo, T., Rafolisy, T., & Bouillon, S. (2022). Stable isotope profiles of soil organic carbon in forested and grassland landscapes in the Lake Alaotra basin (Madagascar): insights in past vegetation changes. *Biogeosciences*, 19, 3825-3841. <https://doi.org/10.5194/bg-2021-336>
- Rhoades, J. (1982). Cation Exchange Capacity. En Page AL, Miller RH, Keeney DR (Eds.) *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Agronomy Monographs N° 9. American Society of Agronomy. Madison, WI, EEUU. pp. 149157.
- Rolando, J., Dubeux, J., Pérez, W., Ramírez, D., Turin, C., Ruiz, M., Comerfor, N., Mares, V., García, S., & Quiroz, R. (2018). Soil organic carbon stocks and fractionation under different land uses in the Peruvian high-Andean Puna. *Geoderma*, 307, 65-72. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.07.037>
- Salazar, D., & Silva, V. (2017). Isótopos en la prehistoria y arqueologías valencianas. *SAGVNTVM-EXTRA*, 19, 75-91.
- Schimmelmann, A., Qi, H., Coplen, T., Brand, W., Fong, J., et al. (2016). Organic Reference Materials for Hydrogen, Carbon, and Nitrogen Stable Isotope-Ratio Measurements: Caffeines, n -Alkanes, Fatty Acid Methyl Esters, Glycines, l -Valines, Polyethylenes, and Oils. *Analytical Chemistry*, 88(8), 4294–4302. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b04392>
- Schimmelmann, A., Qi, H., Dunn, P., Camin, F., Bontempo, L., Potočník, D., et al. (2020). Food Matrix Reference Materials for Hydrogen, Carbon, Nitrogen, Oxygen, and Sulfur Stable Isotope-Ratio Measurements: Collagens, Flours, Honeys, and Vegetable Oils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(39), 10852-10864.
- USDA (United States Department of Agriculture). (2022). Keys to Soil Taxonomy, 13th edition. Washington, DC, USA: Natural Resources Conservation Service.
- Vargas, Benedicto, Amezcu, Mayra., López, J., Cueto, A., Cruz, F., Nájera, J., & Aguirre, C. (2023). Estimación de las reservas de carbono orgánico del suelo en tres tipos de bosque templado en Durango, México. *Ciencias Botánicas*, 101(1), 90-101. <https://doi.org/10.17129/botsci.3094>
- Yuan, T. L. (1958). Determination of Exchangeable Hydrogen in Soils by a Titration Method. Florida Agricultural Experiment Station.