



## RESEARCH ARTICLE



## Soil variability in a toposequence of the Monzón Valley, high jungle of Peru: Morphology, properties and classification

Variabilidad de suelos en una toposecuencia del Valle de Monzón, selva alta del Perú:  
Morfología, propiedades y clasificación

Rodrigo F. Lagos-Damas<sup>1\*</sup> , Nicolás S. Torres-Upiachihua<sup>1</sup> , Leodan Toribio-Dueñas<sup>1</sup> , Julio A. Chia-Wong<sup>1</sup> , Angélica Santos Rabelo de Souza Bahia<sup>2</sup> , Agda Eunice de Souza-Albas<sup>3</sup> , Llerme Navarro-Vásquez<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), Câmpus Jaboticabal, Departamento de Ciência do Solo. Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane, s/n, Jaboticabal, São Paulo, Brasil.

<sup>3</sup> Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Câmpus de Presidente Prudente, Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos. Presidente Prudente, Brasil.

\* Corresponding author: [rodrigo.lagos@unas.edu.pe](mailto:rodrigo.lagos@unas.edu.pe) (R. F. Lagos-Damas).

Received: 21 July 2025. Accepted: 12 October 2025. Published: 10 November 2025.

### Abstract

Knowing the taxonomy, mineralogy, and properties of soils is essential to understand their genesis, functionality, and potential use, and it is fundamental for implementing land-use planning and to characterize soil use management systems. The objective of this study was to describe and correlate the taxonomic characteristics (Soil Taxonomy and World Soil Classification), morphological, physicochemical, and mineralogical characteristics of soils in relation to their physiographic position, based on 15 profiles of a toposequence obtaining 81 horizons. It was verified that soil variability was linked to relief; likewise, soil orders ranging from Entisols to Inceptisols were identified according to the Soil Taxonomy classification. While through the World Soil classification, the groups: Fluvisols, Regosols, Umbrisols, Cambisols, and Luvisols were identified. Morphologically, the fluvial soils were characterized by presenting Ap surface horizons, verifying the absence of subsurface horizons, denoting that they are young soils. In the physical attributes, there were sandy textures in fluvial soils and clayey textures in residual soils. Greater fertility was evidenced in lower terraces, and as the relief rises, fertility decreases. There was a correlation between physical and chemical attributes; in this sense, fertility depends to some extent on physical characteristics. The mineralogical analysis, using X-ray diffraction and X-ray fluorescence, revealed a predominance of 2:1 minerals in fluvial soils, associated with  $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$  molar ratios  $> 2$ ; whereas in residual soils, 1:1 minerals predominated, with ratios  $< 2$ . Finally, fertility decreased according to soil origin: highest in fluvial soils, intermediate in alluvial soils, and lowest in residual soils.

**Keywords:** clay minerals; crystallinity; erosion; weathering.

### Resumen

Conocer la taxonomía, mineralogía y propiedades de los suelos es fundamental para entender su génesis, funcionalidad y potencial de uso, siendo necesario para implementar planes de ordenamiento territorial y caracterizar sistemas de manejo de uso de suelo. El objetivo de estudio fue describir y correlacionar las características taxonómicas (Soil Taxonomy y la Base Referencial Mundial del Recurso suelo "WRB"), morfológicas, fisicoquímicas y mineralógicas de los suelos en relación con su posición fisiográfica, en base a 15 perfiles de una toposecuencia obteniéndose 81 horizontes. Se verificó que la variabilidad edáfica estaba vinculada al relieve; asimismo, se identificaron órdenes desde Entisols a Inceptisols con la clasificación Soil Taxonomy, ya mediante la WRB se identificaron los grupos: Fluvisols, Regosols, Umbrisols, Cambisols y Luvisols. Morfológicamente, los suelos fluviales se caracterizaron por presentar horizontes superficiales Ap, verificándose ausencia de horizontes subsuperficiales denotando ser suelos jóvenes. En los atributos físicos hubo texturas arenosas en suelos fluviales a arcillosas en residuales. Se evidenció mayor fertilidad en terrazas bajas y conforme se asciende en el relieve la fertilidad disminuye. Hubo correlación entre los atributos físicos y químicos, en tal sentido la fertilidad depende en cierta medida de las características físicas. El análisis mineralógico, mediante Difracción y Fluorescencia de Rayos X, reveló mayor predominio de minerales 2:1 en suelos fluviales, asociados a relaciones molares  $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3 > 2$ ; mientras en suelos residuales dominaron minerales 1:1 con relaciones  $< 2$ . Finalmente, la fertilidad disminuyó conforme su origen: mayor en fluviales, intermedia en aluviales y menor en residuales.

**Palabras clave:** cristalinidad; erosión; intemperismo; minerales arcillosos.

DOI: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2026.009>

### Cite this article:

Lagos-Damas, R. F., Torres-Upiachihua, N. S., Toribio-Dueñas, L., Chia-Wong, J. A., Bahia, A. S. R. S., de Souza-Albas, A. E., & Navarro-Vásquez, Ll. (2026). Variabilidad de suelos en una toposecuencia del Valle de Monzón, selva alta del Perú: Morfología, propiedades y clasificación. *Scientia Agropecuaria*, 17(1), 123-140.

## 1. Introducción

A medida que enfrentamos desafíos como el cambio climático, la degradación del suelo y la necesidad de prácticas agrícolas sostenibles resulta vital comprender las complejas relaciones entre las propiedades de los suelos (Dewangan et al., 2024). Según Damaceno et al. (2020), su estudio integral, que comprende su clasificación taxonómica, así como el análisis de sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas, son fundamentales para comprender su génesis, evolución y aptitud para diversos usos agroecológicos. Según Ramírez et al. (2018), estas investigaciones son relevantes debido a que son fundamentales para determinar el ordenamiento territorial y realizar una planificación económica eficiente para cualquier región. Por su parte, Panaifo-Gómez et al. (2021) evidenciaron una marcada variabilidad en las propiedades del suelo en el Valle de Monzón, influenciada principalmente por las prácticas asociadas al cultivo ilícito de *Erythroxylum coca* (coca), característico de la zona de estudio, lo que resalta la necesidad de ser caracterizados detalladamente para una eficiente planificación del uso y conservación de suelos a lo largo de la toposecuencia del Valle de Monzón.

En el Perú existe vacíos en el conocimiento referente al estudio de la clasificación, génesis y atributos del suelo en base a la fisiografía, por lo cual en la zona de estudio aún más existe pocas investigaciones, como los realizados por Ramírez et al. (2018) y Azañero et al. (2020), quienes argumentan que existe una gran necesidad de realizar caracterización de suelos de selva del Perú debido a su gran variabilidad. Según los autores esta heterogeneidad responde a múltiples factores, entre ellos las actividades antrópicas, el relieve, la fisiografía, la estabilidad del paisaje y precipitación, condiciones que generan una moderada a alta susceptibilidad a la erosión y constante formación de suelos. Por ello, resulta esencial conocer sus atributos y características, para planificar un eficiente uso y conservación del recurso suelo.

Por lo cual este presente trabajo tiene como objetivo describir y correlacionar las características taxonómicas (*Soil Taxonomy* y *Clasificación Mundial de Suelos*), morfológicas, físicoquímicas y mineralógicas de los suelos en relación con su posición fisiográfica.

## 2. Metodología

### Área de estudio

Los perfiles colectados se ubican dentro de la Cordillera Oriental (Martínez et al., 1998), siguiendo la toposecuencia del Valle de Monzón de la

provincia de Huamalíes, departamento de Huánuco, selva alta norte del Perú. Se seleccionaron perfiles, considerando criterios de fisiografía y geología. Para criterios de geología se consideró la clasificación geológica propuesta por Martínez et al. (1998), en donde los perfiles 1, 3 y 8 provienen de depósitos fluviales recientes, transportados por el río Monzón. Mientras que los perfiles 2, 4, 5, 6, 7, 9 y 10 son depósitos aluviales con presencia de clastos sub-angulosos a angulosos de diversa composición litológica, resultado de un transporte limitado y una dinámica de sedimentación proximal. Los perfiles 11 y 15 se asientan sobre esquistos y gneis pertenecientes al Complejo Marañón; los perfiles 13 y 14 sobre monzogranitos y sienogranitos del Plutón Cachicoto; y el perfil 12 está constituido por arenisca proveniente del Grupo Mitu. Los criterios de fisiografía se establecieron a partir del Sistema de Información Geológico y Catastral Minero [GEOCATMIN] (2016) y las observaciones realizadas en campo, en donde se seleccionaron suelos de origen fluvial a residual ubicados a lo largo de la toposecuencia del Valle de Monzón (Figura 1).

### Muestreo y clasificación

Se seleccionaron un total de 15 puntos de muestreo (Figura 1), en donde se realizaron calicatas y se tomaron muestras desde el horizonte superficial (A), hasta el límite del suelo basándose en los criterios de Soil Survey Staff (2017) y WRB (2022), haciendo un total ( $n = 81$ ).

Los puntos de muestreo se ubican en coordenadas en UTM 346621 Este; 8973921 Norte, altitud de 920 m.s.n.m. siendo variables a lo largo de la toposecuencia (Tabla 2). Fueron descritos morfológicamente y colectados siguiendo los procedimientos del Soil Survey Staff (2017) y se clasificaron según el Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2022) y la WRB (2022). Los colores se obtuvieron según la Tabla Munsell (Munsell Color Company, 2012).

### Análisis físico y químico

Los análisis físicos incluyeron granulometría, con determinación de arcilla, limo y arena por el método del densímetro (Bouyoucos) y densidad aparente (Da) por el método del cilindro. Los análisis químicos incluyeron determinaciones de pH en agua (relación 1:1); Cationes como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$  se extrajeron con acetato de amonio con concentración de 1 mol  $\text{L}^{-1}$  a pH 7 y se determinó por absorción atómica;  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{H}^+$  se extrajeron con KCl 1 mol  $\text{L}^{-1}$ , se determinó por titulación con NaOH 0,05 mol  $\text{L}^{-1}$ ; P disponible por el método modificado Olsen y determinado por colorimetría; materia orgánica (MO) por el método de Walkley & Black y

CIC pH<sub>7</sub> fue obtenido por saturación con acetato de amonio ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) 1 mol L<sup>-1</sup> a pH<sub>7</sub>. Todos los procedimientos mencionados anteriormente fueron descritos en **Bazán (2017)**. A partir de los resultados obtenidos, fueron calculados la CIC potencial ( $\text{CICpot} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Al} + \text{H}^+$ ), y el porcentaje de saturación de bases ( $\text{SB} = ((\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+) / \text{CICpot}) * 100$ ). El carbono orgánico total (COT) se determinó mediante el método Walkley–Black modificado por **Yeomans & Bremner (1988)**. El stock de carbono (C stock) en cada perfil de suelo evaluado fue estimado por la siguiente fórmula (**Freixos et al., 2002**).

$$[\text{C stock} = (\text{COT} * \text{Da} * \text{e}) / 10]$$

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

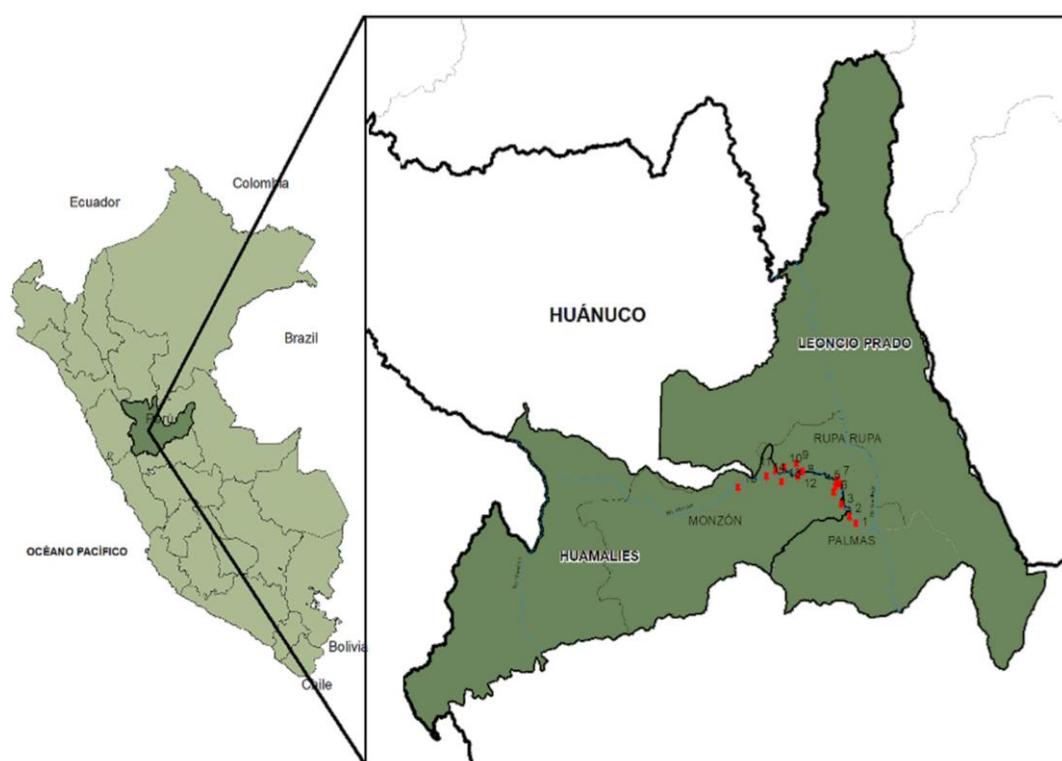
### Análisis mineralógicos

Para los análisis mineralógicos, se seleccionaron muestras de la fracción arcilla de los horizontes y/o capas de cada perfil. Los análisis de difracción de rayos X (DRX) se realizaron sobre la fracción arcilla natural (< 2 µm), orientada en láminas. La fracción arcilla se separó por medio del método de sedimentación (**EMBRAPA, 1979**) y fueron tratadas con el procedimiento de **Danish et al. (2022)** en forma

natural. Los análisis se realizaron en el equipo de Difractómetro de Rayos X Shimadzu modelo DRX-6 000, empleando el ángulo de barrido de  $4^\circ < 2\theta < 45^\circ$ , la identificación de fases se hizo por medio del software Crystallographica-Search Match (CSM), más detalles del software y sus fundamentos se basaron en **Cobo-Vidal et al. (2024)**. El análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) se realizó en muestras de tierra fina secada al aire (TFSA), empleando un espectrómetro de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDX-7000, SHIMADZU), en donde se identificó los elementos y óxidos presente en la muestra. Con los resultados se calcularon las relaciones molares de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$  (donde  $\text{R}_2\text{O}_3 = \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), en donde previamente fueron divididas por su peso atómico, se consideró la relación  $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3 > 2$  para el grupo de los minerales 2:1 y < 2 para minerales 1:1 (**Cobo-Vidal et al. 2024**).

### Análisis estadísticos

Para observar las correlaciones entre los atributos físicos y químicos de los suelos, se realizó la correlación de Pearson, para lo cual empleamos las medias de los resultados numéricos de los análisis fisicoquímicos de cada perfil. El análisis se realizó en RStudio v2023.06.1, generando una matriz de correlación con representación gráfica a través de escala de colores.



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio. Los puntos rojos indican las calicatas realizadas en la toposecuencia siguiendo el río Monzón.

### 3. Resultados y discusión

#### Clasificación de suelos

Estudios recientes han demostrado que la ubicación en el relieve influye en procesos de meteorización, evolución y génesis del suelo, condicionando su desarrollo morfológico y sus propiedades fisico-químicas (Ferrier & Perron, 2019). La posición topográfica y el relieve controlan la dinámica hídrica, la redistribución de materiales y la diferenciación de horizontes, dando lugar a patrones espaciales específicos de formación y transformación de suelos (Damaceno et al., 2020). Por lo cual en este estudio se interpretan los resultados conforme su posición en el relieve.

En la **Tabla 2** en las terrazas bajas (P1, P3, P8 y P11) se identificaron suelos jóvenes como *Typic Udifluvents*, *Udorthents* y *Udifluent* (Soil Taxonomy), los cuales se desarrollan a partir de depósitos fluviales recientes. Estos suelos presentan horizontes poco desarrollados, alta fertilidad inicial y drenaje imperfecto, reflejo de deposición continua de sedimentos por parte del río Monzón (WRB, 2022) (**Figura 2**). En las terrazas medias (P6, P9 y P14), altas (P2 y P12) y pie de monte (P5), los suelos muestran una mayor evolución, con presencia de horizontes Bw cárnicos, lo que indica procesos de meteorización más intensos y cierta estabilidad geomorfológica (Buol et al., 2011). Los cuales fueron clasificados en la Soil Taxonomy como *Typic Epiaquepts*, *Fluventic Dystrudepts*, *Typic Udorthents*, *Typic Humudepts* o *Typic Dystrudepts*, suelos desarrollados sobre materiales parentales arcillosos. La alta actividad biológica, junto al clima cálido y húmedo (isohipertermia), favorece la formación de humus y retención de nutrientes, benefician la agricultura local (FAO, 2009) (**Tabla 1** y **Figura 2**).

En la **Tabla 2** los suelos de origen residual, como colina (P4), montaña baja (P10 y P13) y alta (P7 y P15), son suelos más evolucionados y ácidos; como *Typic Dystrudepts*, *Typic Eutrudepts* y *Oxic Dystrudepts*, desarrollados sobre materiales de mayor alteración geológica como glauconitas, lutitas y esquistos metamórficos presentan clases texturales arcillosas. Las condiciones fisiográficas, los climas tropicales y subtropicales, promueven la lixiviación de bases, la acidificación y la formación de horizontes cárnicos (WRB, 2022). Los principales órdenes encontrados alrededor de la toposecuencia del Valle de Monzón, se encontró que 10 perfiles son del orden *Inceptisols* según la clasificación del Soil Taxonomy, mientras que en la WRB pertenecen a los grupos de referencia como los *Cambisols*, *Umbrisols* y *Luvisols*, los cuales son de desarrollo incipiente, originados a partir de

depósitos aluviales a suelos residuales, con drenaje variando desde imperfecto (*Gleysols*) a bueno.

Estos suelos presentan secuencia de horizontes genéticos A-Bw-C (Lama et al., 2024). Cinco perfiles son del orden *Entisols* (Soil Taxonomy) o *Fluvisols* y *Regosols* (WRB), los cuales ocupan los depósitos fluviales recientes (*Fluvents*) con relieve plano. Son caracterizados por ser suelos jóvenes, sin presencia de algún horizonte de diagnóstico subsuperficial, con secuencia de horizontes genéticos de A-C. En general el predominio del régimen de humedad údico e isohipertermia en todos los perfiles evaluados genera que adquieran la denominación "ud" (Soil Survey Staff, 2022), es característico de regiones tropicales con lluvias bien distribuidas y temperaturas elevadas durante todo el año, favorecen la descomposición de la materia orgánica, intensa actividad biológica y procesos acelerados de formación de horizontes como cárnicos, ándicos y óxicos (Kämpf & Curi, 2012).

#### Atributos morfológicos

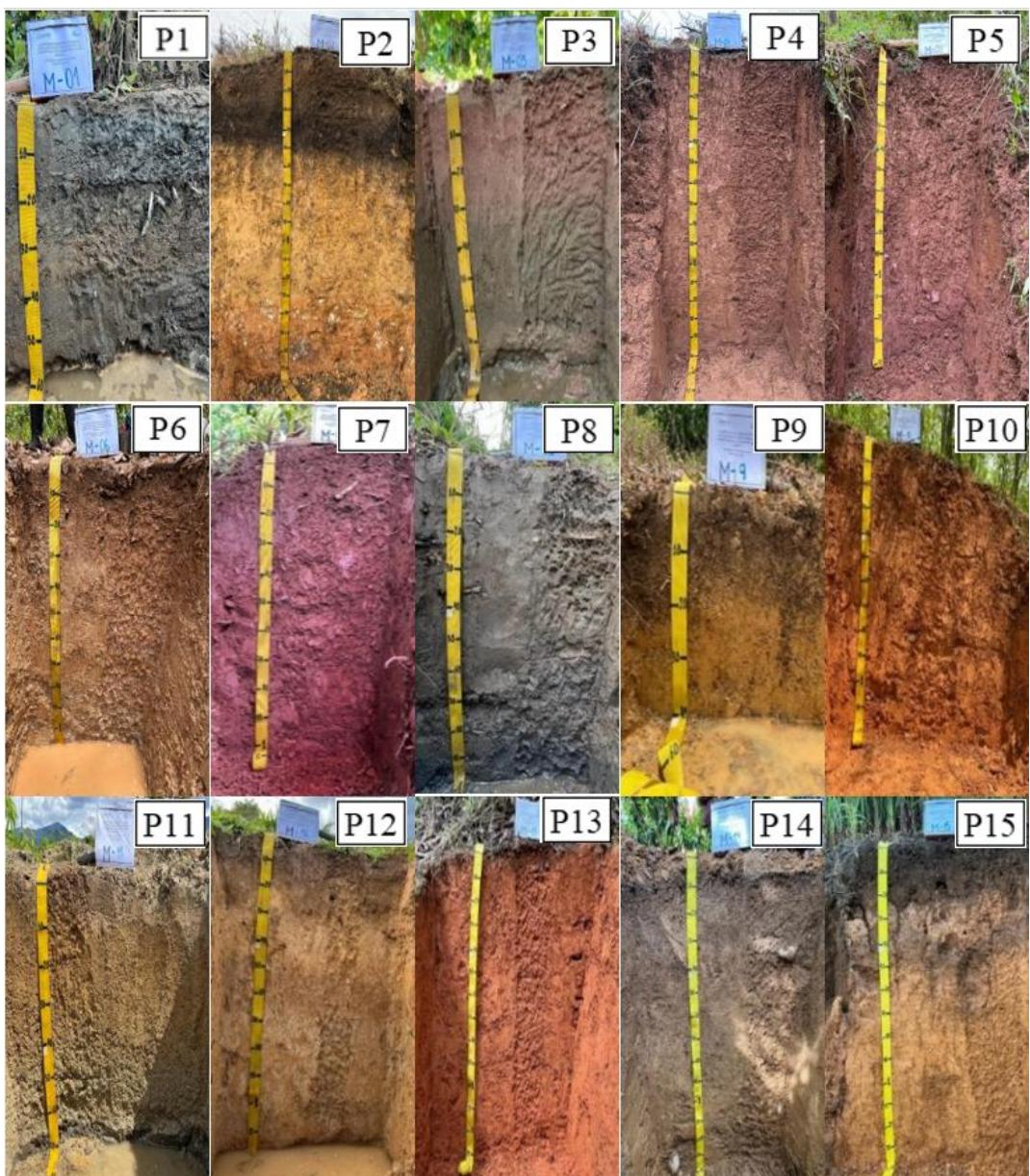
En la **Tabla 3** los suelos ubicados en posiciones fisiográficas bajas, como las terrazas bajas inundables (P1, P3 y P8) y no inundables (P11), presentan clase textural granular simple sin unidades estructurales propias de la roca madre, en contraste su consistencia va de muy friable a suelta (IUSS Working Group WRB, 2022). Característica asociada a su ubicación en el relieve, ya que estas zonas están sujetas a inundaciones frecuentes y a deposiciones continuas de sedimentos, principalmente fracciones de arena y limo (Rychtecká et al., 2023). Mientras que los suelos de origen aluvial presentan características poco desarrolladas, con perfiles poco profundos y estructuras que varían de granular fina en la superficie a masiva en mayores profundidades (Cipriano-Silva et al., 2020).

Los perfiles de origen fluvial e incluyendo a los perfiles P2 y P9, presentan horizonte superficial Ap, asociadas a áreas dedicadas a cultivos agrícolas (**Tabla 3**). Arias et al. (2010), la presencia de este horizonte se debe a la intensa actividad antrópica, debido a que presenta características favorables para la agricultura. Los 10 perfiles restantes de la **Tabla 3**, muestran al horizonte superficial A. Según la Guía de descripción de suelos (FAO, 2009), es la capa superficial donde se acumula materia orgánica humificada, la cual se encuentra incorporada a la fracción mineral y no presenta propiedades de los horizontes E o B. En regiones tropicales, la intensidad y frecuencia de las lluvias provocan una severa erosión hídrica, eliminando principalmente al horizonte superficial A (Wang et al., 2021). Como resultado de

esta dinámica erosiva y por sus condiciones fisiográficas favorables, los suelos de origen residual (P4, P7, P10 y P13) tienden a presentar horizonte A de menor espesor (**Tabla 3**). Una excepción a esta tendencia es el P15, cuyo horizonte A alcanza un grosor de 25 cm, atribuible a procesos de conversión de bosque primario a uso agrícola (chacra), beneficiando así la acumulación de residuos orgánicos (**Soil Survey Staff, 2017**).

Los resultados de la **Tabla 3** indican que los suelos a partir de terrazas medias a suelos residuales comienzan a desarrollar horizontes Bw, los cuales

son clasificados como cámbicos según el *Soil Taxonomy* y la *WRB*. Estos reflejan desarrollo estructural, siendo común los bloques subangulares, así como se presentan en los resultados de esta investigación (**Arias et al., 2010**). Según **Jasso-Castañeda (2012)** los horizontes Bw son resultado de: (i) amplio tiempo de estabilidad del paisaje, lo cual favoreció la evolución del perfil; (ii) intemperismo moderado, vinculado a procesos de alteración mineralógica; y (iii) efecto de procesos tipogenéticos, como la pardificación y la andosolización.



**Figura 2.** Perfiles de suelos en estudio alrededor de una toposecuencia del Valle de Monzón. Perfiles: (P1, P3, P8 y P11) terraza baja, (P9 y P14) terraza media, (P2 y P12) terraza alta, (P5) pie de monte, (P4) colina alta, (P10 y P13) montaña baja y (P7 y P15) montaña alta.

**Tabla 1**

Clima, temperatura, precipitación, centro poblado, según los perfiles de suelo en estudio

Perfil	Clima	Temperatura	Precipitación	Centro Poblado
P01, P02, P03, P04, P05	Lluvioso, muy húmedo, cálido	Min: 17-21 °C Max: 31-33 °C	2 100 a 500 mm	Sachavaca, Soledad, Palo Wimba, Palo de acero, Agua blanca, Rondos, Inti y Bella
P06, P07, P08, P09, P10, P11, P13, P14, P12, P15	Lluvioso, templado y húmedo	Min: 11-17 °C Max: 25-29 °C	1 200 - 3 000 mm	Tazo Grande, Cachicoto, Río Espino y Manchuria

P: codificación de los perfiles, con sus condiciones climáticas. Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (**SENAMHI**, 2020).**Tabla 2**

Taxonomía de suelos en estudio por medio de la clasificación WRB (2022) y Soil taxonomy (2022)

P	Ubicación E/N	Alt.	Fisiografía	Taxonomía del suelo	WRB	R.H.	R.T.	Vegetación	Geología
1	0385198 8970299	675	Terraza baja inundable	Typic Udifluvents	Hypereutric Anofluvic Fluvisols (Loamic, Ochric)	Udico	Isohiper-térmico	<i>Manihot esculenta</i> C.	Depósito fluvial
2	0383625 8971983	706	Terraza alta	Typic Humudepts	Cambic Umbrisols (Epiloamic, Endoclayic)	Udico	Isohiper-térmico	<i>Theobroma cacao</i> L.	Arenisca
3	0381621 8974801	698	Terraza baja inundable	Typic Udorthents	Hypereutric Regosols (Loamic, Ochric)	Udico	Isohiper-térmico	<i>Theobroma cacao</i> L.	Depósito fluvial
4	0379822 8977543	750	Colina alta	Typic Dystrudepts	Orthodystric Cambisols (Clayic, Ochric)	Udico	Isohiper-térmico	<i>Erythroxylum coca</i> Lam.	Arenisca
5	0385198 8970303	732	Pie de monte	Typic Dystrudepts	Dystric Cambisols (Clayic, Ochric)	Udico	Isohiper-térmico	<i>Erythroxylum coca</i> Lam.	Arenisca
6	0385198 8970304	707	Terraza media	Typic Epiaquepts	Dystric Cambisols (Clayic, Ochric)	Udico	Isohiper-térmico	<i>Theobroma cacao</i> L.	Depósito aluvial
7	385198 8970305	734	Montaña alta	Typic Eutrudepts	Haplic Luvisols (Clayic, Differentic, Ochric)	Udico	Isohiper-térmico	Purma	Glauconita
8	0372111 8982543	718	Terraza baja inundable	Typic Udifluvents	Hypereutric Anofluvic Fluvisols (Loamic, Ochric)	Udico	Isohiper-térmico	<i>Zea mays</i> L.	Depósito fluvial
9	0370746 8984311	740	Terraza media	Fluventic Dystrudepts	Fluvic Cambisols (Clayic, Ochric)	Udico	Isohiper-térmico	<i>Theobroma cacao</i> L.	Arenisca
10	0367684 8983468	769	Montaña baja	Typic Dystrudepts	Dystric Cambisols (Clayic, Ochric)	Udico	Isohiper-térmico	<i>Erythroxylum coca</i> Lam.	Arenisca
11	0365705 8982689	753	Terraza baja no inundable	Typic Udorthents	Hypereutric Regosols (Loamic, Ochric)	Udico	Isohiper-térmico	<i>Manihot esculenta</i> C.	Depósito fluvial
12	0371057 8981387	734	Terraza alta	Typic Dystrudepts	Dystric Cambisols (Clayic, Ochric)	Udico	Isohiper-térmico	<i>Brachiaria</i> spp.	Acumulación, areniscas, lutitas
13	0367151 8979995	720	Montaña baja	Typic Dystrudepts	Orthodystric Cambisols (Clayic, Ochric)	Udico	Isohiper-térmico	Purma baja	Areniscas
14	0363436 8981326	765	Terraza media	Typic Udorthents	Hypereutric Regosols (Clayic, Ochric)	Udico	Isohiper-térmico	<i>Theobroma cacao</i> L	Arenisca
15	0356545 8978842	975	Montaña alta	Oxic Dystrudepts	Hyperdystric Cambisols (Clayic, Ochric)	Udico	Isohiper-térmico	<i>Pteridium aquilinum</i> (L.)	Esquistos metamórficos

P: perfil, Alt: altitud, R.H.: régimen de humedad y R.T.: régimen de temperatura.

**Tabla 3**

Atributos morfológicos de suelos pertenecientes al Valle de Monzón

Horizontes	Profundidad (cm)	Color en húmedo	Pedregosidad	Estructura (grado, tamaño, tipo)	Consistencia Húmeda
<b>P1. Typic Udifluvents / Hypereutric Anofluvic Fluvisols (Loamic, Ochric) - Depósito fluvial</b>					
Ap	0 - 10	5Y 2.5/2	NPd	1 F Gr	MFr
C1	10 - 18	5Y 3/2	NPd	0 - SS	MFr
2C	18 - 25	5Y 3/2	NPd	0 - SS	Fr
3C	25 - 30	5Y 2.5/2	NPd	0 - SS	L
4C	30 - 40	5Y 3/2	NPd	0 - SS	Fr
5C	40 - 60	5Y 4/2	NPd	0 - SS	L
<b>P2. Typic Humudepts / Cambic Umbrisols (Epiloamic, Endoclayic) - Depósito aluvial</b>					
Ap	0 - 20	10YR 3/4	NPd	1 F Gr	Fr
A2	20 - 33	10YR 2/2	NPd	1 F Gr	Fr
AB	33 - 50	10YR 2/2	NPd	0 - Ma	Fr
Bw	50 - 90	10YR 6/8	NPd	1F Bls	Fi
BC	90 - 140	10YR 6/8	NPd	1F Bls	Fi
C	140 - 175	7.5YR 5/8	NPd	0 - Ma	Fi
<b>P3. Typic Udorthents / Hypereutric Regosols (Loamic, Ochric) - Depósito fluvial</b>					
Ap	0 - 13	7.5YR 2.5/3	NPd	1F Gr	MFr
AC	13 - 30	7.5YR 3/3	NPd	1F Gr	MFr
C1	30 - 58	5Y 4/2	NPd	0 - SS	Fr
C2	58 - 68	5Y 3/2	NPd	0 - SS	MFr
2C	68 - 80	5Y 4/3	NPd	0 - SS	Fr
<b>P4. Typic Dystrudepts / Orthodystric Cambisols (Clayic, Ochric) - Depósito aluvial</b>					
A	0 - 5	5Y 3/4	NPd	1 F Gr	Fr
Bw1	5 - 20	5Y 4/4	NPd	1 F Bls	Fi
Bw2	20 - 40	5Y 4/4	NPd	1 F Bls	Fi
Bw3	40 - 60	5Y 4/4	NPd	1 F Bls	Fi
Bw4	60 - 110	5Y 4/4	NPd	1 F Bls	Fi
Bw5	110 - 125	5Y 4/4	NPd	1 F Bls	Fi
BC	>125	5Y 4/4	NPd	0 - Ma	Fi
<b>P5. Typic Dystrudepts / Dystric Cambisols (Clayic, Ochric) - Depósito aluvial</b>					
A	0 - 5	7.5YR 2.5/3	NPd	1 F Gr	Fr
Bw1	5 - 20	7.5YR 3/4	NPd	1 F Bls	Fi
Bw2	20 - 40	7.5YR 4/4	NPd	1 F Bls	Fi
BC	40 - 60	7.5YR 3/4	NPd	1 F Bls	Fi
C	60 - 110	5YR 3/3	NPd	0 - Ma	Fi
<b>P6. Typic Epiaquepts / Dystric Cambisols (Clayic, Ochric) - Depósito aluvial</b>					
A	0 - 20	7.5YR 2.5/2	NPd	1 F Gr	Fr
Bw1	20 - 30	7.5YR 4/4	NPd	1 F Bls	Fr
2C1	30 - 45	7.5YR 4/6	NPd	0 - Ma	Fr
3C2	45 - 70	7.5YR 4/6	NPd	0 - Ma	Fr
4Cg	70 - 90	7.5YR 5/6	NPd	0 - Ma	Fr
5Cg	>90	7.5YR 5/6	NPd	0 - Ma	Fr
<b>Pf 7. Typic Entrudepts / Haplic Luvisols (Clayic, Differentic, Ochric) - Depósito aluvial</b>					
A	0 - 12	5YR 3/3	NPd	1 F Gr	Fr
Bw1	12 - 25	5YR 3/4	NPd	1 F Bls	Fr
Bw2	25 - 38	2.5YR 2.5/4	NPd	1 F Bls	Fr
BC	38 - 60	2.5YR 4/6	NPd	0 - Ma	Fr
C	60 - 110	2.5YR 3/6	NPd	0 - Ma	Fr
<b>P8. Typic Udifluvents / Hypereutric Anofluvic Fluvisols (Loamic, Ochric)- Depósito fluvial</b>					
Ap	0 - 8	5Y 4/2	NPd	1 F Gr	MFr
C1	8 - 16	5Y 3/2	NPd	0 - SS	MFr
C2	16 - 30	5Y 4/2	NPd	0 - SS	Fr
2C	30 - 55	5Y 4/1	NPd	0 - SS	L
2C2	55 - 80	5Y 5/1	NPd	0 - SS	Fr
3C	80 - 100	5Y 3/2	NPd	0 - SS	L
<b>P9. Fluventic Dystrudepts /Fluvic Cambisols (Clayic, Ochric) - Depósito aluvial</b>					
Ap	0 - 20	10Y 3/4	NPd	1 F Gr	Fr
Bw	20 - 40	10Y 6/8	NPd	1 F Gr	Fr
C	>40	10Y 6/8	NPd	0 - Ma	Fr
<b>P10. Typic Dystrudepts /Dystric Cambisols (Clayic, Ochric) - Depósito aluvial</b>					
A	0 - 10	7.5YR 4/4	NPd	1 F Gr	Fr
Bw1	10 - 40	5YR 5/6	NPd	1 F Gr	Fr
Bw2	40 - 70	5YR 5/8	NPd	0 - Ma	Fr
BC	>70	5YR 5/8	NPd	0 - Ma	Fr
<b>P11. Typic Udorthents / Hypereutric Regosols (Loamic, Ochric)- Complejo Marañón</b>					
A	0 - 20	10YR 3/3	NPd	1 F Gr	Fr

C1	20 - 40	10YR 5/4	NPd	0 - SS	Fr
C2	40 - 70	2.5Y 5/4	NPd	0 - SS	Fr
2C	>70	5Y 2.5/1	NPd	0 - SS	Fr
<b>P12. Typic Dystrudepts /Dystric Cambisols (Clayic Ochric) – Grupo Mitu</b>					
A	0 - 15	10YR 5/4	NPd	1 F Gr	Fr
Bw1	15 - 30	10YR 7/6	NPd	1 F Bls	Fr
Bw2	30 - 50	10YR 7/4	NPd	1 F Bls	Fr
Bw3	50 - 70	10 YR 7/6	NPd	1 F Bls	Fr
Bw4	70 - 100	10 YR 6/4	NPd	1 F Bls	Fr
BC	> 100	10YR 7/2	NPd	0 - Ma	Fr
<b>P13. Typic Dystrudepts / Orthodystric Cambisols (Clayic, Ochric) - Pluton Cachicoto</b>					
A	0 - 8	5YR 4/6	NPd	1 F Gr	Fr
Bw1	8 - 12	5YR 5/8	NPd	1 F Bls	Fr
Bw2	12 - 40	5YR 5/8	NPd	1 F Bls	Fr
Bw3	40 - 60	5YR 5/8	NPd	1 F Bls	Fr
BC	60 - 90	5YR 5/8	NPd	1 F Bls	Fr
C	>90	5YR 5/8	NPd	0 - Ma	Fr
<b>P14. Typic Udutohents / Hypereutric Regosols (Clayic, Ochric)- Pluton Cachicoto</b>					
A	0-35	10YR 3/3	Lg	1 F Gr	Fr
Bw	35 - 60	10YR 3/6	Lg	1 F Gr	Fr
C1	60 - 80	10YR 4/6	Lg	0 - Ma	Fr
C2	80 - 100	10YR 5/6	Lg	0 - Ma	Fr
C3	100 - 110	10YR 5/6	Lg	0 - Ma	Fr
C4	>110	10YR 5/6	Lg	0 - Ma	Fr
<b>P15. Oxic Dystrudepts / Hyperdystric Cambisols (Clayic, Ochric)– Complejo Marañón</b>					
A	0 - 25	10YR3/4	NPd	1 F Gr	Fr
Bw1	25 - 40	10YR 3/6	NPd	2 F Gr	Fr
Bw2	40 - 55	10YR 3/6	NPd	3 F Gr	Fr
Bw3	55 - 80	7.5YR 5/8	NPd	1 F Bls	Fr
Bw4	80 - 110	7.5YR 5/8	NPd	2 F Bls	Fr
BC	>110	7.5YR 5/8	NPd	0 - Ma	Fr

P: perfil. Estructura: 0: sin estructura, 1: débil, 2: moderada, 3: fuerte. Tamaño: F: fino, M: medio, C: grueso. Tipo: Gr; granular, Bls: bloques subangulares, Ma; masivo, SS; granular simple, Consistencia: MFr: muy friable, Fr: friable, Fi: firme, L: suelta. NPd: no pedregoso, Lg: ligeramente pedregoso"

En cuanto a la coloración los diferentes horizontes del suelo presentan colores en húmedo entre 5YR y 10YR, asociados comúnmente a suelos con tonalidades rojizas a pardas, los cuales indican presencia de hierro. Asimismo, se observaron colores de 2.5Y, 5Y, 2.5YR y 7.5YR, los cuales corresponden a tonalidades más claras y estas indican con frecuencia un empobrecimiento de Fe y Mn (FAO, 2009). Independientemente del perfil, las coloraciones más oscuras se encuentran en los primeros horizontes (**Tabla 3**). Según Chinchilla et al. (2011), el color oscuro del horizonte superficial se relaciona con el contenido de material orgánico y los rojos-amarillos del subsuelo es causado por el contenido de óxidos de hierro en distintos estados de hidratación.

#### Atributos físicos y químicos

En la **Tabla 4** los perfiles (P1, P3, P8 y P11) ubicados en terrazas bajas, presentan clases texturales con predominio de la fracción arena. A medida que se profundiza en el perfil, se observa un aumento progresivo de arena, apreciándose una variación irregular en sus valores de cada horizonte. García-Angulo & Lee (2022) menciona que su discontinuidad litológica se debe a sucesivas deposiciones de sedimentos fluviales depositados por el río en períodos de inundación. Mientras que los suelos

ubicados en relieves más altos, como terrazas medias, altas, pie de monte y suelos de origen residual, se observó predominancia de la fracción arcilla (**Tabla 2** y **4**). Conforme se profundiza aumenta fracciones de arcilla debido a procesos de iluviación de arcilla favorecido por las condiciones de clima y relieve (Corrêa de Medeiros et al., 2020). Estudios como el de Zhang et al. (2023) quienes, mediante el análisis de 1446 perfiles de suelos de china, encuentran que el contenido de arcilla aumenta conforme la profundidad del perfil, y concluyen que los factores que controlan esta variación son la temperatura, la precipitación y la ubicación en el relieve.

Los diferentes perfiles presentan valores variables de densidad aparente (Da), los perfiles de depósitos fluviales (P1, P3, P8 y P11) presentaron valores más altos, variando conforme el contenido de arena (**Tabla 4**). Por su parte los resultados de correlación muestran que existe correlación fuerte positiva entre la Da y el contenido de arena ( $r = 0,71$ ;  $p \leq 0,001$ ); mientras que con la arcilla presenta correlación fuerte negativa ( $r = -0,80$ ;  $p \leq 0,001$ ) (**Figura 3**). Resultados similares se redactan en Pereira dos Santos et al. (2025), quienes asocian el aumento de la Da debido a procesos de pérdida de la porosidad por causa del aumento de la fracción de arena.

**Tabla 4**

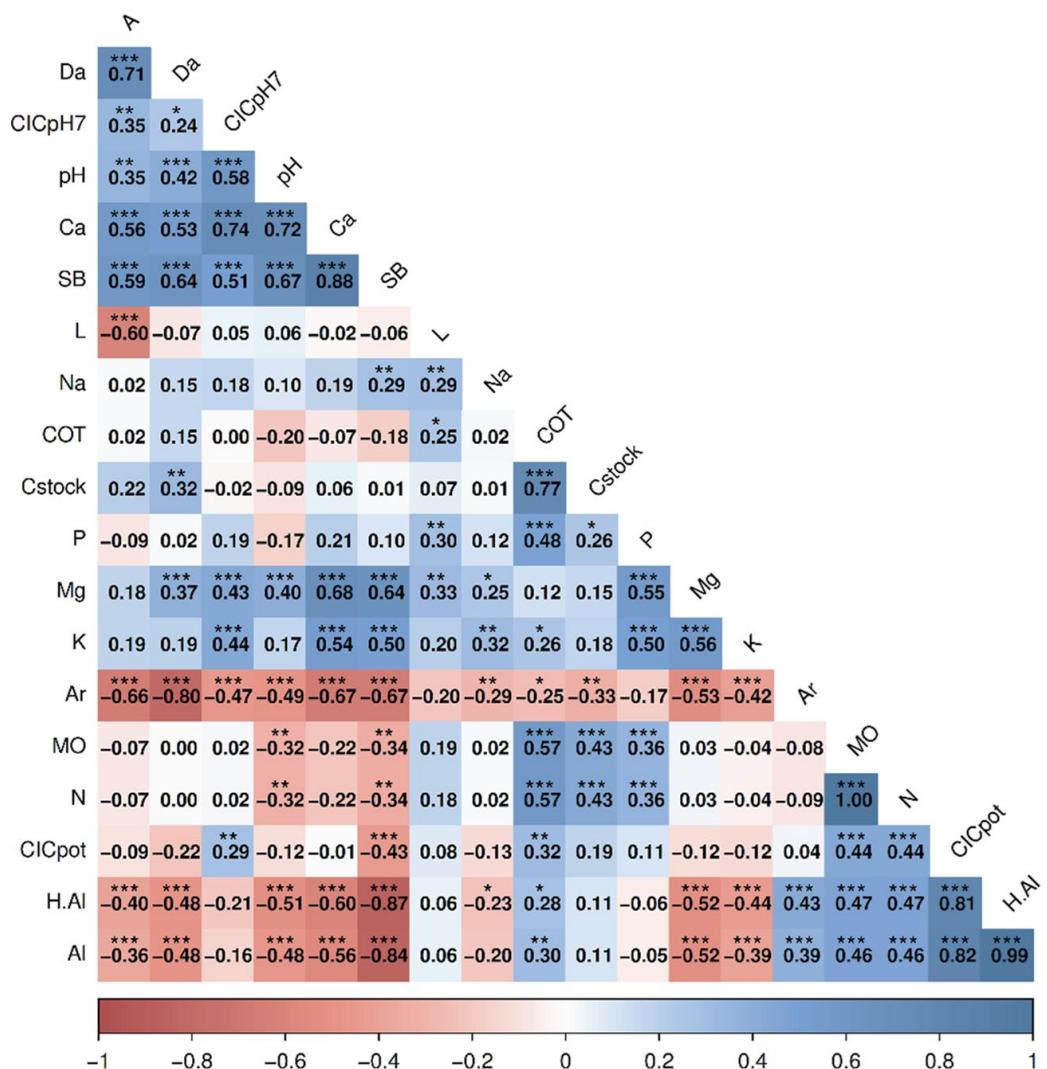
Características físicas y químicas de suelos pertenecientes a la toposecuencia del Valle de Monzón

Hrz	A	L	Ar	C.T	Da g·cm <sup>-3</sup>	pH 1:1	P	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	H+Al <sup>a</sup>	Al <sup>3+</sup>	CIC pot	CIC pH <sub>7</sub>	SB	MO	N	COT (g/kg)	C stock (Mg/ha)
	(%)	cmol(+) kg <sup>-1</sup>												%						
<b>P1. Typic Udifluvents / Hypereutric Anofluvisc Fluvisols (Loamic, Ochric) - Depósito fluvial</b>																				
Ap	42	52	6	SIL	1,35	6,14	3,20	6,20	0,32	0,19	0,08	1,10	0,50	7,89	18,30	86,05	1,10	0,05	15,33	20,70
C1	75	15	10	LS	1,68	6,01	2,50	5,60	0,28	0,21	0,04	0,80	0,30	6,93	16,20	88,45	0,50	0,02	6,99	9,39
2C	65	20	15	SiCL	1,28	6,01	1,70	6,10	0,22	0,18	0,05	0,20	0,10	6,75	17,30	97,03	0,30	0,01	7,70	6,90
3C	35	55	10	SIL	1,38	5,38	1,00	5,30	0,25	0,22	0,05	0,21	0,09	6,03	17,10	96,52	0,40	0,02	6,99	4,82
4C	60	25	15	SL	1,52	5,76	0,80	6,00	0,21	0,12	0,06	0,14	0,10	6,53	15,90	97,86	0,10	0,01	5,29	8,04
5C	78	12	10	LS	1,69	6,63	0,20	6,40	0,24	0,08	0,01	0,12	0,10	6,85	15,80	98,25	0,10	0,01	5,01	16,93
<b>P2. Typic Humudepts / Cambic Umbrisols (Epiloamic, Endoclayic) - Depósito aluvial</b>																				
Ap	40	40	20	L	1,33	4,46	8,35	2,50	0,21	0,15	0,04	8,30	7,50	11,20	13,20	25,86	5,58	0,25	76,73	204,10
A2	38	42	20	L	1,34	4,76	6,50	2,30	0,18	0,16	0,07	8,50	8,10	11,21	13,40	24,20	5,31	0,24	66,26	115,43
AB	42	45	13	L	1,32	4,70	4,80	2,10	0,15	0,12	0,02	7,90	7,30	10,29	12,70	23,26	6,62	0,30	49,85	111,87
BW	35	30	35	CL	1,23	4,60	2,30	2,10	0,12	0,13	0,06	10,10	9,20	12,51	13,20	19,24	1,48	0,07	17,88	87,98
BC	30	20	50	C	1,02	4,62	1,10	2,00	0,12	0,09	0,09	9,30	8,60	11,60	12,80	19,81	1,20	0,05	14,34	73,16
C	35	10	55	C	1,01	4,61	0,90	1,80	0,09	0,05	0,03	8,10	7,10	10,07	11,50	19,55	0,50	0,02	8,69	30,71
<b>P3. Typic Udorthents / Hypereutric Regosols (Loamic, Ochric) - Depósito fluvial</b>																				
Ap	25	70	5	SiL	1,25	4,81	11,00	5,20	0,61	0,22	0,08	1,40	1,30	7,51	9,60	81,35	1,45	0,07	30,19	49,06
AC	20	75	5	SiL	1,22	4,78	9,30	4,80	0,32	0,19	0,09	1,65	1,56	7,05	9,20	76,60	1,10	0,05	33,30	69,07
C1	90	5	5	S	1,72	4,80	5,60	5,00	0,25	0,21	0,03	1,50	1,00	6,99	8,60	78,55	0,60	0,03	31,74	152,88
C2	80	10	10	LS	1,61	5,49	4,20	5,20	0,31	0,18	0,03	1,10	0,98	6,82	7,40	83,88	0,50	0,02	22,69	36,53
2C	35	15	50	C	1,02	5,61	4,00	5,30	0,28	0,19	0,02	1,30	0,87	7,09	8,30	81,67	0,20	0,01	4,87	5,96
<b>P4. Typic Dystrudepts / Orthodystric Cambisols (Clayic, Ochric) - Depósito aluvial</b>																				
Ap	28	30	42	CL	1,22	4,44	12,50	2,30	0,12	0,15	0,02	7,30	6,80	7,47	11,20	25,95	1,58	0,07	87,76	53,54
Bw1	26	26	50	C	1,02	4,56	2,30	3,50	0,15	0,17	0,03	5,30	4,80	5,65	10,70	42,07	0,74	0,03	55,65	85,15
Bw2	26	26	48	C	1,01	4,42	3,10	1,70	0,11	0,14	0,01	5,10	4,70	5,36	9,35	27,76	0,72	0,03	31,74	64,12
Bw3	19	34	47	C	1,05	4,27	1,70	1,10	0,14	0,13	0,02	4,10	3,70	4,39	8,24	25,31	0,69	0,03	24,39	51,22
Bw4	20	24	56	C	1,10	4,79	1,20	2,30	0,12	0,15	0,02	4,20	3,70	6,79	7,13	38,14	0,22	0,01	8,26	45,44
Bw5	10	38	52	C	1,07	4,81	1,40	1,10	0,14	0,12	0,03	4,30	3,90	4,56	6,20	24,42	0,00	0,00	7,84	12,58
BC	7	28	65	C	1,12	4,92	1,20	1,50	0,10	0,10	0,02	4,80	3,60	6,52	6,50	26,79	0,00	0,00	7,27	20,36
<b>P5. Typic Dystrudepts / Dystric Cambisols (Clayic, Ochric) - Depósito aluvial</b>																				
A	28	58	14	SiL	1,35	4,66	16,00	3,50	0,33	0,18	0,04	4,10	3,50	8,15	15,30	49,67	2,60	0,12	72,06	48,64
Bw1	30	35	35	CL	1,21	4,28	11,00	3,82	0,28	0,19	0,07	4,73	4,20	9,09	15,80	47,99	1,40	0,06	38,39	69,68

Bw2	40	22	38	CL	1,23	4,43	5,00	3,50	0,22	0,21	0,06	4,20	3,60	8,19	14,80	48,71	1,30	0,06	37,12	91,32
BC	30	20	50	C	1,02	4,39	4,20	3,30	0,20	0,16	0,05	4,61	4,10	8,32	14,60	44,62	1,25	0,06	17,03	34,75
C	35	17	48	C	1,03	4,78	3,50	4,10	0,21	0,12	0,02	4,10	3,30	8,55	15,20	52,07	1,12	0,05	7,98	41,09
<b>P6. Typic Epiaquepts / Dystric Cambisols (Clayic, Ochric) - Depósito aluvial</b>																				
A	30	60	10	SiL	1,35	5,20	12,00	4,50	0,50	0,21	0,02	5,20	3,80	10,43	16,00	50,16	2,20	0,10	71,21	192,27
Bw1	32	34	34	CL	1,24	4,56	6,50	4,10	0,34	0,20	0,06	5,30	4,20	10,00	15,30	46,99	1,80	0,08	24,81	30,77
2C1	34	22	44	C	1,02	4,58	5,80	3,80	0,28	0,18	0,04	5,50	4,50	9,80	15,40	43,85	1,10	0,05	13,92	21,30
3C2	31	25	44	C	1,03	4,56	5,10	3,90	0,24	0,17	0,01	5,50	5,20	9,82	15,10	44,00	1,00	0,05	7,70	19,82
4Cg	33	21	46	C	1,04	5,05	4,80	4,10	0,18	0,18	0,03	4,60	3,50	9,09	15,00	49,38	0,95	0,04	6,42	13,36
5Cg	35	27	38	C	1,05	4,68	4,60	4,20	0,17	0,16	0,02	6,70	6,30	11,25	13,50	40,43	0,80	0,04	11,37	35,83
<b>P7. Typic Eutrudepts / Haplic Luvisols (Clayic, Differentic, Ochric) - Depósito aluvial</b>																				
A	33	33	34	CL	1,21	5,86	12,00	4,80	0,35	0,18	0,05	2,80	2,30	8,18	14,80	65,77	2,30	0,10	92,15	133,80
Bw	30	30	40	CL	1,23	5,65	10,00	4,74	0,33	0,19	0,04	2,60	2,20	7,90	13,80	67,08	1,50	0,07	46,74	74,74
Bw2	32	21	47	C	1,02	5,50	8,30	4,70	0,34	0,16	0,02	2,85	2,50	8,07	13,90	64,70	1,30	0,06	21,13	28,02
BC	33	25	42	C	1,03	5,68	7,50	4,72	0,31	0,15	0,02	2,52	2,10	7,72	13,70	67,37	1,10	0,05	14,77	33,47
C	35	28	37	C	1,04	5,48	6,40	4,44	0,29	0,12	0,02	2,10	1,50	6,97	12,80	69,86	1,00	0,05	14,63	76,06
<b>P8. Typic Udifluvent / Hypereutric Anofluvic Fluvisols (Loamic, Ochric) - Depósito fluvial</b>																				
Ap	31	56	13	SiL	1,35	6,32	5,60	6,2	0,5	0,21	0,09	0,00	0,00	7,00	1,20	100	1,20	0,05	9,25	9,99
C1	66	27	7	SL	1,46	6,48	1,30	5,8	0,3	0,15	0,10	0,00	0,00	6,35	0,70	100	0,70	0,03	6,56	7,67
C2	20	63	17	SiL	1,34	6,79	4,40	5,5	0,4	0,17	0,08	0,00	0,00	6,15	0,50	100	0,50	0,02	5,72	10,72
2C	28	52	20	SiL	1,36	5,85	4,50	5,6	0,2	0,31	0,09	0,10	0,06	6,30	0,60	98,41	0,60	0,03	67,68	230,10
2C2	69	21	10	SL	1,48	5,94	1,10	5,3	0,3	0,18	0,08	0,09	0,04	5,95	0,40	98,48	0,40	0,02	20,99	77,68
3C	75	17	8	SL	1,59	6,20	0,90	5,60	0,20	0,16	0,04	0,07	0,04	5,87	0,40	99,75	0,40	0,02	4,02	12,78
<b>P9. Fluventic Dystruedeps / Fluvic Cambisols (Clayic, Ochric) - Depósito aluvial</b>																				
Ap	34	35	31	CL	1,23	4,68	7,00	2,85	0,25	0,18	0,03	4,20	3,20	7,51	3,21	44,08	3,21	0,14	88,75	218,34
Bw	40	10	50	C	1,02	4,79	4,50	2,91	0,21	0,20	0,06	3,80	2,90	7,18	1,50	47,06	1,50	0,07	19,72	40,23
C	25	35	40	C	1,00	4,67	3,70	2,70	0,19	0,19	0,04	4,00	3,50	7,12	1,21	43,81	1,21	0,06	12,22	30,56
<b>P10. Typic Dystruedeps / Dystric Cambisols (Clayic, Ochric) - Depósito aluvial</b>																				
A	32	35	33	CL	1,22	3,57	13,40	2,58	0,23	0,21	0,11	2,57	2,22	5,70	2,57	54,87	2,57	0,12	52,26	63,75
Bw1	30	20	50	C	1,05	3,67	11,20	2,51	0,21	0,19	0,06	2,48	2,15	5,45	1,74	54,48	1,74	0,08	17,88	56,33
Bw2	30	25	45	C	1,07	3,82	6,50	2,44	0,25	0,20	0,08	2,35	1,85	5,32	1,20	55,79	1,20	0,05	33,73	108,26
BC	18	48	34	SiCL	1,31	4,02	4,30	2,65	0,27	0,17	0,06	2,31	1,20	5,46	1,11	57,67	1,11	0,05	13,78	90,25
<b>P11. Typic Udorthents / Hypereutric Regosols (Loamic, Ochric) – Depósito fluvial</b>																				
A	15	70	15	SiL	1,35	4,90	6,32	3,54	0,32	0,18	0,03	1,63	0,90	5,70	1,10	71,39	1,10	0,05	80,69	217,87
C1	75	15	10	LS	1,65	5,12	4,99	4,09	0,28	0,18	0,04	0,91	0,42	5,51	0,52	83,45	0,52	0,02	49,99	164,98
C2	78	18	4	LS	1,66	5,23	6,22	4,12	0,29	0,17	0,03	0,89	0,38	5,50	0,48	83,85	0,48	0,02	37,97	189,09
2C	88	7	5	S	1,72	4,78	1,44	3,36	0,19	0,09	0,06	1,35	0,92	5,05	0,35	73,23	0,35	0,02	64,42	332,42

P12. Typic Dystrudepts / Dystric Cambisols (Clayic Ochric) – Grupo Mitú																				
A	35	30	35	CL	1,25	4,26	7,09	2,42	0,25	0,19	0,09	3,03	2,33	5,98	2,55	49,31	2,55	0,12	81,68	153,15
Bw1	38	12	50	C	1,08	4,16	5,82	2,31	0,21	0,12	0,03	2,98	2,41	5,66	1,81	47,31	1,81	0,08	20,14	32,63
Bw2	7	43	50	SiC	1,31	4,85	3,51	2,87	0,27	0,11	0,04	2,50	1,39	5,80	1,35	56,86	1,35	0,06	10,38	27,21
Bw3	6	45	49	SiC	1,33	4,72	6,23	2,54	0,29	0,12	0,04	2,46	0,89	5,45	1,12	54,82	1,12	0,05	2,60	6,92
Bw4	6	46	48	SiC	1,35	4,75	4,22	2,55	0,26	0,09	0,05	2,38	0,88	5,33	1,10	55,31	1,10	0,05	4,44	17,99
BC	7	44	49	SC	1,36	4,77	3,66	2,61	0,20	0,10	0,05	2,71	0,78	5,67	1,00	52,16	1,00	0,05	1,47	20,01
P13. Typic Dystrudepts / Orthodystric Cambisols (Clayic, Ochric) - Pluton Cachicoto																				
A	35	35	30	CL	1,21	4,48	2,52	1,20	0,21	0,19	0,03	3,57	3,21	5,20	1,55	31,39	1,55	0,07	84,79	82,08
Bw1	22	29	49	C	1,13	4,38	1,93	1,00	0,18	0,15	0,03	3,22	2,72	4,58	1,28	29,63	1,28	0,06	24,67	11,15
Bw2	17	37	46	C	1,11	4,58	1,85	0,90	0,17	0,14	0,03	3,11	2,35	4,35	1,32	28,54	1,32	0,06	17,17	38,13
Bw3	21	31	48	C	1,12	5,04	1,74	0,92	0,15	0,11	0,05	2,98	2,22	4,21	1,12	29,28	1,12	0,05	10,95	24,53
BC	24	26	50	C	1,13	4,86	1,70	0,80	0,12	0,09	0,07	2,54	1,98	3,62	1,08	29,87	1,08	0,05	12,51	42,39
C	18	39	43	C	1,07	4,83	1,68	0,81	0,11	0,08	0,03	2,13	1,93	3,16	1,00	32,64	1,00	0,05	11,23	48,07
P14. Typic Udorthents / Hypereutric Regosols (Clayic, Ochric) - Pluton Cachicoto																				
A	60	25	15	SL	1,45	5,56	9,00	6,30	0,40	0,21	0,04	0,50	0,00	7,45	3,02	93,29	3,02	0,14	82,11	416,69
C1	75	15	10	LS	1,65	4,88	8,24	5,81	0,38	0,18	0,03	0,80	0,00	7,20	1,93	88,89	1,93	0,09	35,28	145,53
C2	55	8	37	SC	1,37	4,69	3,50	3,84	0,35	0,17	0,04	0,94	0,18	5,34	2,13	82,40	2,13	0,10	21,84	59,85
C3	60	10	30	SC	1,35	4,57	3,40	3,75	0,27	0,15	0,05	0,98	0,38	5,19	1,74	81,22	1,74	0,08	13,78	37,20
C4	65	7	28	SC	1,38	4,64	4,40	3,67	0,22	0,13	0,05	1,00	0,00	5,07	2,13	80,26	2,13	0,10	7,27	10,03
C5	63	5	32	SC	1,36	4,35	2,90	3,52	0,20	0,10	0,04	1,13	0,22	4,99	2,24	77,34	2,24	0,10	3,45	14,08
P15. Oxic Dystrudepts / Hyperdystric Cambisols (Clayic, Ochric)– Complejo Marañón																				
A	25	35	40	L	1,31	4,86	5,60	3,10	0,28	0,10	0,03	8,12	7,23	11,64	5,21	30,22	5,21	0,23	93,71	295,30
Bw1	35	35	30	CL	1,23	4,15	1,30	2,20	0,12	0,09	0,04	12,10	11,10	14,55	3,37	16,82	3,37	0,15	89,46	165,06
Bw2	28	40	32	CL	1,21	4,45	1,40	2,30	0,15	0,10	0,05	9,25	8,09	11,85	2,26	21,95	2,26	0,10	63,43	115,13
Bw3	17	38	45	C	1,10	4,28	0,90	1,20	0,10	0,06	0,03	8,75	7,11	10,15	1,82	13,76	1,82	0,08	28,07	77,18
Bw4	22	30	48	C	1,09	4,69	1,00	1,30	0,11	0,05	0,04	8,62	7,00	10,11	1,56	14,76	1,56	0,07	13,92	45,52
BC	23	25	52	C	1,00	4,77	0,50	1,10	0,09	0,05	0,05	8,41	6,78	9,70	1,32	13,29	1,32	0,06	9,25	27,76

Hrz: horizonte, Prf: profundidad, A: arena, L: limo, Ar: arcilla, C.T: clase textural: S: Arenoso, LS: arena franca, SL: Franco arenoso, L: Franco, SiL: Franco limoso, Si: Limoso, SCL: Franco arcillo arenoso, CL: Franco arcilloso, SiCL: Franco arcillo limoso, SC: Arcillo arenoso, SiC: Arcillo limoso, C: Arcilloso. Da: densidad aparente, P: fosforo, Ca<sup>2+</sup>: calcio intercambiable, Mg<sup>2+</sup>: magnesio intercambiable, K<sup>+</sup>: potasio intercambiable, Na<sup>+</sup>: sodio intercambiable, Al<sup>3+</sup>: aluminio intercambiable, H+Al<sup>3+</sup>: acidez potencial, CICpot: capacidad de intercambio catiónico potencial, CIC pH<sub>7</sub>: capacidad de intercambio catiónico a pH<sub>7</sub>, SB: suma de bases, MO: materia orgánica, N: nitrógeno, COT: carbono orgánico total, C stock: stock de carbono orgánico.



**Figura 3.** Coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) entre las características físicas y químicas de muestras de suelo. Niveles de significancia: \*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$  y \*\*\*  $P < 0.001$ . La fuerza de la correlación fue clasificada como: sin correlación ( $|r| < 0.20$ ), débil (0,20–0,39), moderada (0,40–0,69) y fuerte ( $\geq 0.70$ ). La escala de intensidad se muestra en la parte inferior. Las siglas y abreviaturas en el grafico son las siguientes: A: arena, Da: densidad aparente, CICpH7: capacidad de intercambio catiónico a pH7, Ca: calcio intercambiable, SB: suma de bases, L: limo, Na: sodio intercambiable, COT: carbono orgánico total, Cstock: stock de carbono orgánico, P: fosforo, Mg: magnesio intercambiable, K: potasio intercambiable, Ar: arcilla, MO: materia orgánica, N: nitrógeno, CICpot: capacidad de intercambio catiónico potencial, H+Al: acidez potencial, Al: aluminio intercambiable.

En la **Tabla 4** los suelos de origen fluvial; principalmente los pertenecientes a terrazas bajas (P1, P3, P8 y P11) y perfiles (P12 y P14) presentaron altas concentraciones de cationes intercambiables ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ ) aumentando a mayor profundidad, los resultados implican altos porcentajes de SB ( $\geq 50\%$ ). Sin embargo, los resultados de correlación indican que solo los cationes de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  son los que presentan fuerte y moderadas correlaciones positivas con la SB ( $r = 0.88$ ,  $0.64$  y  $0.50$  consecutivamente,  $p \leq 0.001$ ), este resultado se debe a las bajas concentraciones de  $\text{Na}^+$  en los suelos estudiados. De igual manera sucede con los valores de pH aumentando a medida que se incrementa las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  debido a su fuerte

y moderada correlación positiva ( $r = 0.72$  y  $0.40$ ;  $p \leq 0.001$ ) y reducen a medida que aumenta H+Al, puesto que presenta correlación fuerte negativa ( $r = -0.40$ ;  $p \leq 0.001$ ) y a la vez esta acidez (H+Al) presenta correlación fuerte positiva con el contenido de  $\text{Al}^{3+}$  ( $r = 0.99$ ;  $p \leq 0.001$ ) por lo tanto la acidez de los suelos en estudio se debe principalmente a la concentración de  $\text{Al}^{3+}$  (**Figura 3**).

**Chinchilla et al. (2011)** mencionan que la fertilidad de los suelos residuales es natural y su principal factor formador es el material parental sobre el que ha intervenido el clima y el relieve, con procesos de remoción, desborde y deposición de materiales de las partes altas a la planicie del valle en un tiempo geológico reciente. Los perfiles P12 y P14 presentan

características similares, influenciadas por las actividades antrópicas que se desarrollan en su entorno. En el caso del perfil P14 perteneciente a terraza media, las prácticas agrícolas como la aplicación de enmiendas, favoreció la SB en los horizontes superficiales; mientras que en la terraza alta (P12), la presencia de pastizales favoreció la conservación de la fertilidad de dichos suelos. Los pastizales bien manejados conservan el suelo al mejorar la infiltración, retener nutrientes y estabilizar el carbono, lo que reduce la erosión y la pérdida de fertilidad (FAO, 2021).

En tanto a los suelos ubicados a partir de terrazas medias (P2, P5, P6, y P9) y perfiles de suelos residuales (P4, P10, P13, y P15) presentan características comunes, como mayores contenidos de arcilla; por lo tanto, mayores concentraciones de H+Al conllevando a la acidez al suelo, con pH ácidos, menores a 5,5. Los resultados de correlación de Pearson indica que existe correlación moderada positiva entre el contenido de arcilla y las cantidades de H+Al ( $r = 0,43$ ;  $P \leq 0,001$ ), por lo tanto, el aumento de la acidez conforme la profundidad del perfil se debe al aumento de arcilla (Figura 3).

Se observa en la Tabla 4 que en todos los perfiles estudiados hay una reducción de la MO conforme la profundidad del perfil, en tanto la correlación de Pearson indica que la MO tiene fuerte correlación positiva altamente significativa ( $p \leq 0,001$ ) con el N ( $r = 1$ ), moderada con COT ( $r = 0,57$ ) y débil con P ( $r = 0,36$ ), estas mostrando las mismas tendencias conforme la profundidad (Figura 3). Según Pérez Trujillo et al. (2022), las condiciones tropicales la del Valle de Monzón genera la rápida descomposición de la MO y los intensos procesos de lixiviación reducen su retención. En tanto las reducciones de MO conforme la profundidad genera disminuciones de N, P y COT (Tabla 4) consecuentemente también reducciones en el contenido de Cstock, puesto que se evidencia fuerte correlación positiva ( $r = 0,77$ ;  $p \leq 0,001$ ) entre el COT y Cstock.

En la Figura 3 se muestra que la CICpot presenta una moderada correlación positiva con MO ( $r = 0,44$ ;  $p \leq 0,001$ ), pero una fuerte correlación positiva frente a H+Al ( $r = 0,81$ ;  $p \leq 0,001$ ). Entre la CICpot y CIC a pH<sup>7</sup> se encontró una débil correlación ( $r = 0,29$ ;  $p \leq 0,01$ ). Además en la Tabla 4 se observa que la CICpot y CIC a pH<sup>7</sup> disminuye conforme se incrementa la profundidad, esta variación es influenciado por la MO que al descomponerse (humus) proporciona sitios de intercambio debido a que sus cargas negativas retienen a los cationes intercambiables (Arthur & Okae-Anti, 2022). Las variaciones en la CIC tambien son asociadas a la

presencia de materiales inorgánicos como el Al<sup>3+</sup> (Solly et al., 2020), característica evidenciada fuertemente en los perfiles P2 y P15 de la Tabla 4. Resultado reforzado en la Figura 3, donde se evidencia una fuerte correlación positiva ( $r > 0,82$ ;  $p \leq 0,001$ ) entre los contenidos de Al<sup>3+</sup> y la CICpot.

#### Atributos mineralógicos

A partir de los datos individuales de la Tabla 5, se observa una tendencia decreciente en la relación SiO<sub>2</sub>/R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (donde R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a medida que el relieve cambia de suelos fluviales hacia residuales (Tabla 2). Los promedios calculados muestran que los perfiles en terrazas bajas inundables (P1, P3 y P8) alcanzan una relación de 4,36, seguidos por la terraza baja no inundable (P11) con 2,84, terrazas medias (P6, P9 y P14) con 3,28, pie de monte (P5) con 2,33, y los suelos residuales de colina alta (P4), montaña baja (P10 y P13) y montaña alta (P15) presentan promedios de 1,71, 1,85 y 1,79, respectivamente. Según Alcalde-Aparicio et al. (2023), la disminución de las relaciones SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y SiO<sub>2</sub>/R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> indica mayor intemperismo, con pérdida de sílice y acumulación relativa de óxidos de Al y Fe. En la Tabla 5 los suelos de depósitos fluviales (P1, P3, P8 y P11) ubicados en terrazas bajas, presentan caracteres como menores valores de Al y Fe, y estos disminuyen a mayor profundidad, consecuentemente sucede lo mismo con las concentraciones de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, las causas principales se deben a su ubicación en el relieve, lo que genera que haya mayor cantidad de arena, por las constantes deposiciones de sedimentos por el río Monzón, principalmente arena y limo, y en profundidad hay mayor cantidad de arena. Smith et al. (2020) mencionan que el aluminio presenta cierta afinidad por los sedimentos más finos (arcilla), mientras que en sedimentos más gruesos (arena) son fácilmente lixividos. En cuanto estos suelos presentan porcentajes de SiO<sub>2</sub> > al 50 % característica que se asocia al mayor contenido de arena puesto que está constituida por cuarzo en más del 90 % y a la vez su fórmula química es SiO<sub>2</sub> (González et al., 2013).

En la Figura MS1 (Material Suplementario), los difractogramas de los depósitos fluviales correspondientes a los perfiles P1 y P3 muestran picos basales amplios y de menor intensidad en las capas más profundas, mientras que en el perfil P8 dichos picos se observan a profundidades variables. En el perfil P11, en cambio, se evidencian picos basales amplios e intensos en todos los horizontes. Según Bastida & Ibáñez (2024), los picos amplios e irregulares se asocian con una baja cristalinidad, atribuida a estructuras desordenadas, cristales de tamaño reducido y posibles interestratificaciones con distintos

niveles de hidratación, los cuales son indicadores de un mayor grado de intemperismo. Por consiguiente, en los perfiles P1 y P3 se observa un incremento del intemperismo con la profundidad, posiblemente relacionado con las constantes deposiciones de material fluvial. En el perfil P8, la actividad agrícola, especialmente el cultivo de *Zea mays* (maíz), junto con su mayor distancia respecto al cauce del río, favorece un mayor grado de alteración del suelo en el horizonte superficial. En el perfil P11, ubicado en terrazas bajas no inundables los procesos de intemperismo se denotan en todo el perfil, lo cual se atribuye a su estabilidad fisiográfica y a un mayor grado de desarrollo del suelo.

En la **Figura MS2 (Material Suplementario)** en los suelos de origen aluvial se observa una marcada variabilidad en los difractogramas. En los perfiles de terrazas medias (P6, P9 y P14), los perfiles P9 y P14, presentan picos homogéneos en todo el perfil, lo que sugiere una conservación relativa del grado de intemperismo entre horizontes. Por el contrario, en el perfil P6 se muestra picos basales cortos e intensos en todos los horizontes, fenómeno asociado al origen geológico de depósito aluvial; mientras que el P9 y P14 pertenecen a la geología de arenisca.

Estos resultados coinciden con **Suther et al. (2022)**, quienes mencionan que las diferencias mineralógicas entre suelos aluviales y aquellos formados sobre arenisca, se explican principalmente por el origen del material parental y su grado de meteorización, siendo los suelos aluviales más heterogéneos y menos desarrollados en su mineralogía. En cuanto a los perfiles P2 y P12, ubicados en terrazas altas, los picos basales cortos e intensos se asocian a la actividad agrícola y ganadera desarrollada en estas áreas. Finalmente, en el P5 se evidencia un mayor grado de intemperismo, relacionado con su posición en el relieve (pie de monte) y las prácticas culturales vinculadas al cultivo de *E. coca*. En concordancia, los resultados de la **Tabla 5**, muestran un contenido superficial de hierro del 15,2%, que aumenta con la profundidad, fenómeno atribuible a la presencia de material geológico del tipo lutita.

En la **Figura MS3 (Material Suplementario)** los suelos de origen residual (P4, P10, P13 y P15) presentan picos irregulares, lo que evidencia distintos grados de intemperismo a lo largo del perfil. Este comportamiento se asocia principalmente con la estabilidad del paisaje, las condiciones edafoclimáticas y las actividades antrópicas. La excepción es el perfil P7, que muestra picos cortos e intensos, característica relacionada con el proceso de regeneración natural, dado que en esta zona predomina una ve-

getación de purma. En cuanto a la composición mineralógica, se observa la presencia dominante de caolinita, con dos picos bien definidos, junto con un pico irregular de cuarzo, lo que indica un mayor grado de intemperismo. Esta interpretación se fundamenta en las propiedades del cuarzo, un mineral de baja solubilidad, alta dureza y estructura estable (**Menezes et al., 2023**).

En los perfiles P10, P13 y P15 se identificaron fases dominantes como illita, caolinita y cuarzo (**Figura MS3, Material Suplementario**), lo que sugiere un proceso de intemperismo intermedio. En estos casos, aún persisten minerales heredados (como la illita), coexistiendo con productos de meteorización secundaria, como la caolinita, típicos de ambientes ácidos y húmedos (**Menezes et al., 2023**). Por su parte, el perfil P7 mostró mayor intensidad en los picos de caolinita y cuarzo, lo que refleja un estado avanzado de intemperismo y una mayor lixiviación de sílice. Esta condición favorece la formación de arcillas pobres en bases y la concentración de minerales resistentes, como el cuarzo (**Menezes et al., 2023**).

En general los suelos pertenecientes a depósitos fluviales (P1, P3, P8 Y P11), terrazas medias (P9 y P14) y Pie de monte (P5), presentan picos basales de 14 Å. Según **Albers et al. (2002)** en su estudio de las arcillas menciona que el pico indica presencia de vermiculita o/y montmorillonita. La posible presencia de montmorillonita se asocia a su capacidad de hidratación interlaminar, su presencia suele confirmarse mediante tratamiento con etilenglicol o glicerol, elevando el pico basal a 17 Å si es que fuese montmorillonita (**Albers et al., 2002**). **Bastidas-Obando & Carbonell (2010)**, señala que la vermiculita generalmente se encuentra enmascarada con la presencia de montmorillonita. Sin embargo, la coexistencia del pico 14 Å y de illita, indica mayor presencia de minerales 2:1 en la fracción arcilla de los suelos estudiados. De manera similar, **Lama et al. (2024)** concluyen que los minerales 2:1 son más comunes en suelos de tierras bajas, como resultado del transporte y erosión de materiales desde zonas altas.

En todos los perfiles y horizontes se identificó la presencia de caolinita, siendo el mineral arcilloso predominante en la toposecuencia del Valle de Monzón. De acuerdo con **Ferreira et al. (2024)**, la caolinita es común en la mayoría de los suelos a nivel mundial y su formación se atribuye principalmente al transporte en la fracción limo y a la transformación *in situ* en la fracción arcilla mediante procesos de neogénesis.

**Tabla 5**

Porcentaje (%) de elementos, óxidos y sus relaciones molares en las muestras de suelo

P	Orden	Prf, (cm)	Si	Al	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		SiO <sub>2</sub>		SiO <sub>2</sub>	
									60	102	159,7	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>
P1	Entisols	0 - 10	55,62	14,31	14,95	64,44	17,06	8,07	1,07	0,17	0,05	6,42	21,25	4,93				
		10 - 18	56,64	13,83	14,77	65,98	16,40	8,00	1,10	0,16	0,05	6,84	21,95	5,21				
		18 - 25	54,48	14,44	15,68	64,12	17,32	8,59	1,07	0,17	0,05	6,29	19,87	4,78				
		25 - 30	55,34	14,81	14,66	64,54	17,88	7,90	1,08	0,18	0,05	6,14	21,73	4,79				
		30 - 40	55,96	12,85	16,01	65,69	15,29	8,76	1,09	0,15	0,05	7,30	19,95	5,35				
		40 - 60	56,65	13,25	15,99	66,16	15,79	8,56	1,10	0,15	0,05	7,12	20,57	5,29				
P2	Inceptisols	0 - 20	62,43	17,60	10,36	68,26	20,95	5,12	1,14	0,21	0,03	5,54	35,46	4,79				
		20 - 33	58,62	21,25	10,26	64,01	25,23	5,14	1,07	0,25	0,03	4,31	33,14	3,82				
		33 - 50	58,42	20,74	11,07	63,87	24,49	5,60	1,06	0,24	0,04	4,43	30,37	3,87				
		50 - 90	56,75	22,90	11,47	61,90	27,10	5,86	1,03	0,27	0,04	3,88	28,14	3,41				
		90 - 140	56,13	23,46	11,01	61,28	27,75	5,63	1,02	0,27	0,04	3,75	28,97	3,32				
		140 - 175	54,45	23,94	11,30	59,71	28,57	5,79	1,00	0,28	0,04	3,55	27,47	3,15				
P3	Inceptisols	0 - 13	45,66	20,18	20,57	54,20	24,43	12,04	0,90	0,24	0,08	3,77	11,98	2,87				
		13 - 30	47,53	19,27	19,17	56,29	23,23	10,63	0,94	0,23	0,07	4,12	14,09	3,19				
		30 - 58	48,67	18,24	18,44	57,75	22,12	10,50	0,96	0,22	0,07	4,44	14,65	3,41				
		58 - 68	53,46	16,37	15,61	62,66	19,37	8,28	1,04	0,19	0,05	5,50	20,15	4,32				
		68 - 80	53,15	16,43	15,88	62,20	19,34	8,43	1,04	0,19	0,05	5,47	19,64	4,28				
		0 - 5	35,68	22,59	34,08	44,38	27,37	21,83	0,74	0,27	0,14	2,76	5,41	1,83				
P4	Inceptisols	5 - 20	35,47	24,14	32,67	43,55	29,24	20,80	0,73	0,29	0,13	2,53	5,57	1,74				
		20 - 40	34,34	23,85	33,96	42,88	28,80	21,86	0,71	0,28	0,14	2,53	5,22	1,70				
		40 - 60	34,41	24,36	33,16	42,70	29,61	21,09	0,71	0,29	0,13	2,45	5,39	1,68				
		60 - 110	34,65	24,82	32,89	42,46	29,94	20,90	0,71	0,29	0,13	2,41	5,41	1,67				
		110 - 125	33,93	24,80	33,20	42,06	30,00	21,20	0,70	0,29	0,13	2,38	5,28	1,64				
		>125	34,79	24,84	32,07	42,82	30,08	20,38	0,71	0,29	0,13	2,42	5,59	1,69				
P5	Inceptisols	0 - 5	39,96	19,12	25,42	49,40	23,18	15,85	0,82	0,23	0,10	3,62	8,30	2,52				
		5 - 20	38,49	19,45	26,76	47,86	23,72	16,98	0,80	0,23	0,11	3,43	7,50	2,35				
		20 - 40	38,04	19,73	27,27	47,47	24,07	17,29	0,79	0,24	0,11	3,35	7,31	2,30				
		40 - 60	36,95	20,55	27,67	46,18	25,09	17,57	0,77	0,25	0,11	3,13	7,00	2,16				
		60 - 110	38,53	20,49	25,80	47,67	24,92	16,12	0,79	0,24	0,10	3,25	7,87	2,30				
		0 - 20	56,01	17,08	14,28	64,58	20,41	7,54	1,08	0,20	0,05	5,38	22,81	4,35				
P6	Inceptisols	20 - 30	51,89	19,39	15,71	60,18	23,39	8,61	1,00	0,23	0,05	4,37	18,61	3,54				
		30 - 45	50,42	20,82	15,19	58,25	24,96	8,38	0,97	0,24	0,05	3,97	18,51	3,27				
		45 - 70	46,69	21,19	21,22	54,67	25,28	12,23	0,91	0,25	0,08	3,68	11,90	2,81				
		70 - 90	53,34	20,77	13,42	60,23	24,80	7,05	1,00	0,24	0,04	4,13	22,76	3,49				
		>90	55,11	22,18	9,39	61,33	26,56	4,79	1,02	0,26	0,03	3,93	34,11	3,52				
		0 - 12	49,94	16,69	21,84	59,72	20,13	12,53	1,00	0,20	0,08	5,04	12,68	3,61				
P7	Inceptisols	12 - 25	47,64	19,14	21,43	56,58	22,92	12,23	0,94	0,22	0,08	4,20	12,31	3,13				
		25 - 38	47,14	20,39	20,55	55,59	24,46	11,69	0,93	0,24	0,07	3,86	12,65	2,96				
		38 - 60	44,94	20,56	22,40	53,90	25,00	13,18	0,90	0,25	0,08	3,66	10,88	2,74				
		60 - 110	43,11	20,24	23,51	52,55	24,71	14,30	0,88	0,24	0,09	3,62	9,78	2,64				
		0 - 8	55,14	14,20	15,67	64,35	16,85	8,43	1,07	0,17	0,05	6,49	20,32	4,92				
		8 - 16	53,54	14,02	16,68	63,01	16,66	9,20	1,05	0,16	0,06	6,43	18,24	4,75				
P8	Entisols	16 - 30	54,16	14,14	16,45	63,43	16,93	8,96	1,06	0,17	0,06	6,37	18,84	4,76				
		30 - 55	47,59	17,49	19,49	57,12	20,97	11,23	0,95	0,21	0,07	4,63	13,54	3,45				
		55 - 80	51,86	16,31	16,66	61,00	19,37	9,36	1,02	0,19	0,06	5,35	17,35	4,09				
		80 - 100	54,41	15,41	15,67	63,47	18,37	8,49	1,06	0,18	0,05	5,87	19,90	4,53				
		0 - 20	57,66	19,38	11,19	64,31	22,95	5,73	1,07	0,23	0,04	4,76	29,89	4,11				
		20 - 40	53,99	23,17	12,91	59,57	27,44	6,68	0,99	0,27	0,04	3,69	23,73	3,19				
P9	Inceptisols	>40	52,11	25,54	12,74	57,10	20,38	6,59	0,95	0,30	0,04	3,20	23,05	2,81				
		0 - 10	40,26	28,11	24,10	46,54	33,76	14,32	0,78	0,33	0,09	2,34	8,65	1,84				
		10 - 40	39,22	28,48	24,95	45,89	33,91	14,75	0,76	0,33	0,09	2,30	8,28	1,80				
		40 - 70	38,87	29,73	24,16	44,71	35,56	14,35	0,75	0,35	0,09	2,14	8,30	1,70				
		>70	39,21	30,39	23,77	44,96	36,06	13,97	0,75	0,35	0,09	2,12	8,56	1,70				
		0 - 20	45,95	22,30	16,83	53,66	26,77	9,55	0,89	0,26	0,06	3,41	14,96	2,78				
P11	Entisols	20 - 40	45,60	23,66	16,75	52,64	28,37	9,33	0,88	0,28	0,06	3,15	15,02	2,61				
		40 - 70	47,67	23,42	14,98	54,41	28,06	8,23	0,91	0,28	0,05	3,30	17,59	2,78				
		>70	48,58	20,44	15,17	56,29	24,49	8,33	0,94	0,24	0,05	3,91	17,99	3,21				
		0 - 15	49,50	24,89	12,41	55,60	29,85	6,58	0,93	0,29	0,04	3,17	22,50	2,78				
		15 - 30	47,81	27,55	12,34	53,13	33,16	6,55	0,89	0,33	0,04	2,72	21,60	2,42				
		30 - 50	48,10	27,36	12,79	54,96	31,71	6,65	0,92	0,31	0,04	2,95	21,98	2,60				
P12	Entisols	50 - 70	50,24	25,63	10,93	55,71	30,94	5,66	0,93	0,30	0,04	3,06	26,19	2,74				

	70 - 100	48,11	26,36	13,18	54,12	31,82	7,14	0,90	0,31	0,04	2,89	20,18	2,53
	> 100	48,04	23,80	15,86	54,98	28,55	8,82	0,92	0,28	0,06	3,27	16,59	2,73
<b>P13 Inceptisols</b>	0 - 8	46,07	26,13	20,07	52,15	31,03	11,30	0,87	0,30	0,07	2,86	12,29	2,32
	8 - 12	43,35	30,04	19,37	48,39	35,43	10,81	0,81	0,35	0,07	2,32	11,91	1,94
	12 - 40	43,58	30,52	18,99	48,63	36,19	10,58	0,81	0,35	0,07	2,28	12,23	1,92
	40 - 60	41,28	30,62	20,65	46,62	36,49	11,59	0,78	0,36	0,07	2,17	10,70	1,81
	60 - 90	42,26	30,73	19,62	47,79	36,38	11,07	0,80	0,36	0,07	2,23	11,50	1,87
	>90	41,38	30,33	20,65	46,75	36,07	11,78	0,78	0,35	0,07	2,20	10,56	1,82
<b>P14 Entisols</b>	0 - 35	54,64	19,00	8,75	62,24	23,35	4,44	1,04	0,23	0,03	4,53	37,33	4,04
	35 - 60	53,59	20,73	9,32	60,69	25,13	4,84	1,01	0,25	0,03	4,11	33,39	3,66
	60 - 80	50,03	23,98	12,21	56,31	29,03	6,56	0,94	0,28	0,04	3,30	22,85	2,88
	80 - 100	47,38	25,51	13,80	53,73	30,78	7,43	0,90	0,30	0,05	2,97	19,26	2,57
	100 - 110	45,95	26,20	14,63	52,43	31,55	7,93	0,87	0,31	0,05	2,83	17,60	2,43
	>110	45,24	26,63	15,91	51,76	32,12	8,93	0,86	0,31	0,06	2,74	15,42	2,33
<b>P15 Inceptisols</b>	0 - 25	37,10	21,65	33,46	46,07	26,43	21,28	0,77	0,26	0,13	2,96	5,76	1,96
	25 - 40	37,88	22,99	31,79	46,15	27,63	20,12	0,77	0,27	0,13	2,84	6,10	1,94
	40 - 55	36,91	24,24	31,36	44,78	29,25	19,85	0,75	0,29	0,12	2,60	6,01	1,82
	55 - 80	35,38	25,14	31,93	43,26	30,49	20,31	0,72	0,30	0,13	2,41	5,67	1,69
	80 - 110	35,02	25,61	31,86	42,74	30,75	20,32	0,71	0,30	0,13	2,36	5,60	1,66
	>110	35,39	25,64	31,35	43,27	30,89	19,86	0,72	0,30	0,12	2,38	5,80	1,69

P: perfil; Prf: profundidad.

En general los difractogramas de terrazas bajas (P1, P3, P8 y P11), terrazas medias (P9 y P14) y pie de monte (P5), muestran presencia de minerales 2:1 así como tambien caolinita, cuarzo, halloysita y TiO<sub>2</sub>; mientras que en suelos más elevados la caolinita tiene mayor dominancia. Según **Suther et al. (2022)** señalan que, desde terrazas inferiores a superiores, la fracción arcilla pasa de una mineralogía mixta (caolinita, esmectita, vermiculita, cuarzo e illita) a una dominada por caolinita. De manera similar, en los suelos estudiados se observan ligeras variaciones mineralógicas entre horizontes de un mismo perfil, pero diferencias más marcadas entre suelos ubicados en distintas posiciones del relieve. Resultados similares se redactan en **Cobo-Vidal et al. (2024)**, quienes concluyen que las ligeras diferencias en el perfil se deben a la deposición de sedimentos y al grado de evolución de la roca madre, en cuanto a las diferencias mineralógicas entre los perfiles se debe a su ubicación en el relieve.

#### 4. Conclusiones

Los suelos a lo largo de la toposecuencia del Valle de Monzón muestran variabilidad en los resultados morfológicos, fisicoquímicos y mineralógicos, lo que se traduce en la presencia de suelos de diferentes clasificaciones taxonómicas. Estas diferencias están relacionadas con procesos de lixiviación, erosión e intemperismo, los cuales dependen a su vez de factores como la vegetación, el clima, la geología y la posición en el relieve. En este contexto, los suelos de origen aluvial, especialmente aquellos ubicados en las terrazas bajas, presentan una mayor fertilidad debido al aporte constante de sedimentos transportados por el río Monzón. Estos resultados son una base fundamental para comprender la variabilidad de los suelos a lo largo

de una toposecuencia, siendo necesario impulsar investigaciones futuras que profundicen en la caracterización y génesis, que a su vez se empleen metodologías complementarias. La información generada servirá como soporte técnico y científico para el diseño de programas orientados a la conservación y uso sostenible del recurso suelo del Valle de Monzón, la elaboración de zonificaciones ecológicas y económicas, así como el desarrollo de sistemas de manejo agrícola adaptados a las condiciones edáficas locales, contribuyendo al aprovechamiento sostenible.

#### Agradecimientos

Este trabajo fue subvencionado 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

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

#### ORCID

R. F. Lagos-Damas  <https://orcid.org/0009-0007-9146-4255>  
 N. S. Torres-Upiachihua  <https://orcid.org/0009-0006-5097-9917>  
 L. Toribio-Dueñas  <https://orcid.org/0009-0001-1485-8628>  
 J. A. Chia-Wong  <https://orcid.org/0000-0002-0947-9949>  
 A. S. R. S. Bahia  <https://orcid.org/0000-0002-9316-9774>  
 A. E. de Souza-Albas  <https://orcid.org/0000-0002-7933-9597>  
 L. Navarro-Vásquez  <https://orcid.org/0000-0003-0147-362X>

## Referencias bibliográficas

- Albers, A. P. F., Melchiades, F. G., Machado, R., Baldo, J. B., & Boschi, A. O. (2002). Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X [A simple method for the characterization of clay minerals by X-ray diffraction]. *Cerâmica*, 48(305), 34–37. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132002000100008>
- Alcalde-Aparicio, M., González-López, O., Fernández-Martínez, J. L., Álvarez-González, F., & Arias, D. (2023). Mineralogy and geochemical signatures as indicators of differential weathering in natural soil profiles from the West Asturian-Leonese Zone (NW Iberia). *Catena*, 226, 107036. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107036>
- Arias, F., Mata, R., Alvarado, A., Serrano, E., & Laguna, J. (2010). Mineralogía de la fracción arcilla de algunos suelos cultivados con banano en las llanuras aluviales del Caribe de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 34(2), 197–222. <https://doi.org/10.15517/rac.v34i2.3632>
- Arthur, A., & Okae-Anti, D. (2022). Genesis and Classification of Soils from a Toposequence at Wamaso, Ghana. *Open Access Library Journal*, 9, e9108. <https://doi.org/10.4236/oalib.1109108>
- Azañero Aquino, L., Ñique Álvarez, M., & Florida Rofner, N. (2020). Calidad del suelo en diferentes sistemas de uso en selva alta de Huánuco, Perú. *Revista Tayacaja*, 3(1), 29–40. <https://doi.org/10.46908/tayacaja.v3i1.75>
- Bastida, J., & Pardo-Ibáñez, P. (2024). Applications of X-ray Powder Diffraction Microstructural Analysis in Applied Clay Mineralogy. *Minerals*, 14(6), 584. <https://doi.org/10.3390/min14060584>
- Bastidas-Obando, E., & Carbonell, J. A. (2010). Caracterización espectral y mineralógica de los suelos del valle del río Cauca por espectroscopía visible e infrarroja (400 - 2.500 nm). *Agronomía Colombiana*, 28(2), 291–301.
- Bazán, R. (2017). *Manual of procedures for soil and water analysis for irrigation purposes*. National Institute for Agrarian Innovation – INIA.
- Buol, S. W., Southard, R. J., Graham, R. C., & McDaniel, P. A. (2011). *Soil genesis and classification* (6th ed.). Wiley-Blackwell.
- Chinchilla, M., Mata, R., & Alvarado, A. (2011). Caracterización y clasificación de algunos ultisoles de la región de Los Santos, Talamanca, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 35(1), 59–81. <https://doi.org/10.15517/rac.v35i1.6687>
- Cipriano-Silva, R., Valladares, G. S., Azevedo, A. C., Cunha dos Anjos, L. H., Pereira, M. G., & Pinheiro Júnior, C. R. (2020). Alluvial soil formation in the plains of northeastern Brazil: Soil in space and time – Genesis and soil morphology. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44, e0190110. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190110>
- Cobo-Vidal, Y., Angarica Baró, E., Martín Gutiérrez, G., Serrano Gutiérrez, A., & Rodríguez Fajardo, A. (2024). Mineralogía y química de las arcillas en suelos Pardos y Vertisoles del Oriente de Cuba. *Ingeniería Agrícola*, 14(2). <https://cuid.com/2284/v14n2e04>
- Munsell Color Company. (2012). *Cartas de colores de suelo Munsell*. Baltimore.
- Corrêa de Medeiros, P. S., do Nascimento, P. C., Inda, A. V., & da Silva, L. F. (2020). Genesis and classification of soils from granitic hills in southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 98, 102494. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102494>
- Damaceno, L. M. S., Carvalho, M. C., da Silva, L. F., & da Costa, A. C. S. (2020). Physical, chemical, morphological and mineralogical characterization surface and subsurface in hydromorphic and non-hydromorphic soil of the Central Amazon. *Journal of Agricultural Science*, 12(4), 245–258.
- Danish, A., Totič, E., Bayram, M., Sütçü, M., Gencel, O., Erdoğmuş, E., & Ozbakkaloglu, T. (2022). Assessment of mineralogical characteristics of clays and the effect of waste materials on their index properties for the production of bricks. *Materials*, 15(24), 8908. <https://doi.org/10.3390/ma15248908>
- Dewangan, A., Mishra, P., Sahu, R., & Patel, S. (2024). The role of physico-chemical properties in soil functionality: A literature review. *EPRA International Journal of Research and Development (IJRD)*, 9(4), 20–27.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). (1979). *Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo: Manual de métodos de análise de solos*.
- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos (4.ª ed.). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/i3794s/i3794s.pdf>
- FAO. (2021). Los pastizales y suelos: Una relación vital para la sostenibilidad. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/CB7222EN>
- Ferreira, D. N., Melo, V. F., Testoni, S. A., Vidal-Torrado, P., & de Oliveira, J. C. (2024). Origin and properties of kaolinites from soils of a toposequence in Southern Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 48, e20230028. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230028>
- Frerrier, K. & Perron, J. (2019). The Importance of Hillslope Scale in Responses of Chemical Erosion Rate to Changes in Tectonics and Climate. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125(9), e2020JF005562. <https://doi.org/10.1029/2018JF004856>
- 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>
- García-Angulo, K., & Lee, K. T. (2022). Detección de cambios en la forma del plano debido a la fluctuación estacional del caudal y la grave inundación de 2012 en el río Amazonas cerca de la ciudad de Iquitos, Perú, con base en el análisis de imágenes de teledetección. *Water*, 14(3), 509. <https://doi.org/10.3390/w14030509>
- González, O. J., Bezada-Díaz, M., Del Valle Millán-Boadas, Z., y Carrera, J. M. (2013). Caracterización de las arenas y arcillas minerales de los depósitos de canal y planicie de inundación del río Portuguesa, Venezuela. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 85, 18–32. <https://doi.org/10.14350/ig.35291>
- IUSS Working Group WRB. (2022). *World reference base for soil resources: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps* (4th ed.). International Union of Soil Sciences.
- Jasso-Castañeda, C., Gama Castro, J. E., Solleiro Rebollo, E., & Díaz Ortega, J. (2012). Morfogénesis, procesos y evolución del horizonte Bw cámbico en tefrapaleosuelos del volcán Nevado de Toluca. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(1), 37–47.
- Kämpf, N., & Curi, N. (2012). Formação e evolução do solo (gênese). In J. C. Ker (Eds.), *Pedologia: Fundamentos* (pp. 207–292). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Lama, D. A. I., Schaefer, C. E. G. R., Amaral, E. F., do Vale Lopes, D., Francelino, M. R., & Senra, E. O. (2024). Soil-landform interplays from the highlands of the Eastern Andes Cordillera to the lowlands of the Peruvian Amazon. *Catena*, 244, 108248. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108248>
- Martínez, W., Valdivia, E., & Cuyubamba, V. (1998). *Geología de los cuadrángulos de Aucayacu, Río Santa Ana y Tingo María. Hojas: 18-k, 18-l y 19-k* (Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 112). INGEMMET.
- Menezes, M. D., Oliveira, I. A., Souza, B. F., & Silva, E. M. (2023). Different quartz varieties characterized by proximal sensing and their relation to soil attributes. *Minerals*, 13(4), 529. <https://doi.org/10.3390/min13040529>
- Panairo-Gómez, C., Ñique-Álvarez, M., & Levano-Crisóstomo, J. (2021). Calidad y uso sustentable del suelo en el Valle del Monzón, Huánuco – Perú. *Revista Latinoamericana de*

- Difusión Científica, 3(5), 9-24.  
<https://doi.org/10.38186/difcie.35.02>
- Pereira dos Santos, W., Marques Júnior, J., Pereira, G. T., & de Carvalho, G. M. (2025). Predicting bulk density in Brazilian soils for carbon stocks calculation: A comparative study of multiple linear regression and Random Forest models using continuous and categorical variables. *Discover Soil*, 2(7). <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00035-6>
- Pérez-Trujillo, E., Asado-Hurtado, A. M., & Vega-Jara, L. (2022). Relación del contenido de materia orgánica con el pH de los análisis de suelo en cinco provincias de Huánuco. *Revista Investigación Agraria*, 4(2), 46–54. <https://doi.org/10.47840/RelnA.4.2.1381>
- Ramírez Zumaeta, E. R., Valencia Ramos, M. F., & Vela Alvarado, J. W. (2018). Génesis, morfología, clasificación y susceptibilidad de suelos de la parte media de la cuenca del río Abuja, región Ucayali. *Anales Científicos*, 79(2), 368–376. <https://doi.org/10.21704/ac.v79i2.1230>
- Rychtecká, P., Samec, P., & Rosíková, J. (2023). Floodplain forest soil series along the naturally wandering gravel bed river in temperate submontane altitudes. *Catena*, 222, 106830. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106830>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2020). Guía Técnica para Aplicativo Web Tendencias Históricas - TENDHIS. [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1438907/guia\\_tecnica\\_usuario\\_tendhis.pdf.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1438907/guia_tecnica_usuario_tendhis.pdf.pdf)
- Sistema de Información Geológico y Catastral Minero (GEOCATMIN). (2016). Base de datos de recursos y reservas. GEOCATMIN-INGEMMET. <https://portal.ingemmet.gob.pe/documents/73138/176821/Recursos%2By%2BReservas%2B2016.pdf>
- Smith, A. B., Johnson, C. D., & Martínez, E. F. (2020). Partitioning of metal contaminants between bulk and fine-grained fraction in freshwater sediments: A critical appraisal. *Minerals*, 11(6), 603. <https://doi.org/10.3390/minerals11060603>.
- Soil Survey Staff. (2017). Soil Survey Manual Agriculture. Handbook 18. USDA, Natural Resources Conservation Service. <https://doi.org/10.1097/00010694-195112000-00022>
- Soil Taxonomy Staff. (2022). *A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys (12th ed.)*. USDA-Natural Resources Conservation Service.
- Soil Survey Staff. (2022). *Keys to Soil Taxonomy (13th ed.)*. USDA-Natural Resources Conservation Service. <https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/keys-to-soil-taxonomy>
- Solly, E. F., Poulton, P. R., Hartley, I. P., & Morvan, T. (2020). A critical evaluation of the relationship between effective cation exchange capacity and soil organic carbon content in Swiss forest soils. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, Article 98. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00098>
- Suther, B. E., Leigh, D. S., & West, L. T. (2022). Soil Chemistry and Clay Mineralogy of an Alluvial Chronosequence from the North Carolina Sandhills of the Upper Coastal Plain, USA. *Soil Systems*, 6(1), 1. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6010001>
- Yeomans, C., & Bremner, M. (1988). A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 19(13), 1467–1476. <https://doi.org/10.1080/00103628809>
- Wang, X., Silva, D., & Restrepo, J. D. (2021). Climate and land-use change effects on sediment production in a dry tropical forest catchment. *Water*, 13(16), 2233. <https://doi.org/10.3390/w13162233>
- Zhang, Z., Xu, X., Zhao, Y., Wang, Y., & Wang, J. (2023). Historical and future variation of soil organic carbon in China. *Geoderma*, 436, 116557. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116557>