

*Artículo científico***Evaluación de tres métodos para determinación de la distribución del tamaño de partículas en suelos de Costa Rica**Jorge A. Rojas-Espinoza¹, Manuel E. Camacho-Umaña^{2/*}*Autor para correspondencia. Correo electrónico: manuel.camachoumana@ucr.ac.cr¹Universidad de Costa Rica, Escuela de Agronomía y Centro de Investigaciones Agronómicas, San Pedro, Costa Rica.²Universidad de Costa Rica, Escuela de Agronomía, Centro de Investigaciones Agronómicas, San Pedro, Costa Rica.DOI: <https://doi.org/10.15517/8e0yht17>

Recibido el 20 de octubre del 2025; Aceptado el 19 de diciembre 2025

Resumen

Introducción. La determinación precisa de la distribución del tamaño de partículas del suelo (PSDA) es fundamental en estudios de taxonomía, física y manejo de suelos. Sin embargo, los métodos tradicionales, como la pipeta, aunque precisos, resultan poco prácticos para análisis rutinarios en laboratorios con gran volumen de muestras. **Objetivo.** Evaluar y proponer un método eficaz y práctico para determinar la textura de suelos en Costa Rica. **Materiales y métodos.** Se analizaron 24 muestras de 12 perfiles de suelo representativos, aplicando dos procedimientos de dispersión: 1) batidora industrial y 2) agitador horizontal y tres metodologías basadas en densimetría: 1) Bouyoucos, 2) Bouyoucos con corrección por temperatura (Bouyoucos T) y 3) Bouyoucos modificado (Bouyoucos M), contrastadas con el método de referencia de la pipeta, para un total de 144 análisis. Los resultados se evaluaron mediante regresión lineal, RMSE, índice de concordancia de Willmott y eficiencia de Nash–Sutcliffe. **Resultados.** El agitador horizontal demostró mayor eficacia en la dispersión de partículas que la batidora industrial. Entre las metodologías evaluadas, el método de Bouyoucos modificado (Bouyoucos M) presentó la mayor concordancia con los valores obtenidos por pipeta ($R^2 > 0,9$ para la fracción de arcilla), especialmente al considerar la corrección por humedad gravimétrica de la muestra. La determinación directa de arena mediante tamizado no mejoró la precisión frente al método modificado. **Conclusiones.** El método de Bouyoucos modificado (Bouyoucos M), combinado con dispersión en agitador horizontal y corrección por humedad de la muestra, constituye una alternativa eficaz y confiable al método de referencia, siendo recomendable para análisis rutinarios de textura en laboratorios de Costa Rica.

Palabras clave: suelos tropicales; textura del suelo; física de suelos; análisis de laboratorio; fracción arcillosa.

Research article

Assessment of three methods to determine particle size distribution analysis in soils of Costa Rica

Abstract

Introduction. Accurate determination of soil particle size distribution (PSD) is essential in soil taxonomy, soil physics, and soil management. Although the pipette method is precise, it is impractical for routine laboratory analyses involving large sample volumes. **Objective.** To evaluate and propose an efficient and practical method for soil texture determination in soils from Costa Rica. **Materials and methods.** A total of 24 samples from 12 representative soil profiles were analyzed using two soil sample dispersion procedures: 1) industrial blender, and 2) horizontal shaker; and three hydrometer-based methodologies: 1) Bouyoucos, 2) Bouyoucos corrected by temperature (Bouyoucos T), and 3) Bouyoucos modified (Bouyoucos M), compared against the pipette reference method, for a total of 144 analyses. Performance was assessed through linear regression, RMSE, Willmott's concordance index, and Nash–Sutcliffe efficiency. **Results.** The horizontal shaker achieved superior particle dispersion compared to the industrial blender. Among the tested methodologies, the modified Bouyoucos method (Bouyoucos M) exhibited the highest agreement with pipette-derived values ($R^2 > 0.9$ for clay fraction), particularly when correcting for sample gravimetric moisture. Direct sand determination by sieving did not improve accuracy over the modified method. **Conclusions.** The modified Bouyoucos method, combined with horizontal shaker dispersion and moisture correction, provides an effective and reliable alternative to the reference pipette method and is recommended for routine soil texture analysis in Costa Rican laboratories.

Keywords: tropical soils; soil texture; soil Physics; laboratory analysis; clay fraction.

Introducción

El suelo se describe como un cuerpo natural, heterogéneo, polifásico, disperso y poroso, compuesto de partículas (Hillel 1998). Estas partículas pueden ser de origen orgánico o mineral; siendo estas últimas de interés en estudios de mecánica, taxonomía y física de suelos. De forma general, las partículas minerales se clasifican según su diámetro efectivo en micras (μm) agrupándolos en ámbitos establecidos como arenas, limo y arcillas (Radcliffe y Šimůnek 2018). Existe una relación directa entre la distribución del tamaño de estas partículas y otras propiedades del suelo, entre ellas la fertilidad aparente, la porosidad, la consistencia, la infiltración, la retención de humedad y la erodabilidad del suelo (Hillel 1998, Radcliffe y Šimůnek 2018).

Por todo lo anterior, el análisis y determinación de la distribución del tamaño de partículas del suelo (PSDA por sus siglas en inglés) resulta de gran importancia dentro de los diversos estudios agronómicos, ingenieriles y ecológicos. Dentro de los métodos utilizados para la determinación de PSDA, existe gran variedad de técnicas específicas según el tamaño de las partículas por analizar. Por ejemplo, se encuentran los métodos de tamizado (o cribado) que funcionan para la determinación de la fracción gruesa del suelo, compuesta por partículas de arena (Gee y Or 2002, Jury y Horton 2004). Por otro lado, los métodos fundamentados en el principio de sedimentación de Stokes y las teorías de Fisher-Odén, como los métodos de la pipeta son más adecuados para la cuantificación de las fracciones limo y arcilla.

El método de la pipeta (Robinson 1922, Jennings *et al.* 1922, Krauss 1923) se considera el método de referencia por su precisión para la determinación de las fracciones de arena, limo y arcilla (Day 1965, Hillel 1998). Sin embargo, el método de la pipeta requiere mucho tiempo y se considera poco práctico para su uso como análisis de rutina en laboratorios de análisis físicos de suelo con gran afluencia de muestras. Otras metodologías emergentes, como el sensor láser de turbidez PARIO® permiten una determinación más tecnificada de dichas fracciones (Zhang *et al.* 2024), aunque dicho método carece de estandarización.

Por otro lado, el método del hidrómetro (Bouyoucos 1927, Day 1965, Gee y Or 2002) representa una alternativa práctica a la metodología de pipeta en suelos minerales, y se ha convertido en el método más utilizado en los laboratorios de suelos debido a sus múltiples ventajas, entre las que destacan el tiempo relativamente corto de análisis (Forsythe 1985).

Este último método se ha denominado “método de Bouyoucos” en alusión al científico pionero George John Bouyoucos, quien en 1927 calibró un densímetro de lácteos (lactómetro) para determinar la concentración sólidos de suelo en suspensión y derivar la PSDA del suelo a partir de la ecuación de Stokes (Bouyoucos 1927). Esta metodología ha sido modificada a lo largo de los años por el mismo autor (Bouyoucos 1951, 1930, 1962) debido a múltiples factores: 1) el diámetro efectivo de partícula para la fracción arcilla (según USDA) cambió de 5 μm a 2 μm (Bouyoucos 1951), 2) se realizaron correcciones metodológicas asociadas con el efecto de la temperatura y la solución dispersante (Bouyoucos 1962).

Pese a su versatilidad y ventajas, el método desarrollado por Bouyoucos carecía de principios físicos y confirmación experimental de la aplicabilidad del principio de sedimentación de Stokes (Day 1965 Forsythe 1985). Casagrande (1934) mejoró el método del hidrómetro y sentó bases teóricas sólidas sobre la aplicación de la ley de Stokes. Posteriormente, Day (1956) examinó y corrigió los postulados de Casagrande para este método, profundizando sobre el efecto de la profundidad efectiva de lectura del hidrómetro, o el efecto de la inmersión de hidrómetro, y estableciendo un método robusto para la determinación de PSDA (Gee Or 2002).

Por otro lado, se encuentran métodos como el propuesto por Henríquez y Cabalceta (1999), el cual se fundamenta en la recalibración del método original del hidrómetro de Bouyoucos (Bouyoucos 1962), donde se realizan correcciones empíricas por cambios de temperatura durante las lecturas del hidrómetro. Debido a su extendida difusión académica, esta última metodología ha sido ampliamente utilizada en la mayoría de los laboratorios de suelos de Costa Rica, probablemente por su rapidez y sencillez. Lo anterior se refleja en la literatura disponible, donde se referencia a este método para la determinación de la textura del suelo (Aini *et al.* 2020, Durango *et al.* 2015, Siles *et al.* 2010, Ramírez *et al.* 2008, Hergoualc’h *et al.* 2007, Mollinedo *et al.* 2005, Ares *et al.* 2002).

Mediante un análisis profundo de los principios físicos de sedimentación en la ecuación de Stokes (Casagrande 1934, Day 1956, Gee y Or 2002) y la evaluación de las metodologías empleadas en los laboratorios de suelos en Costa Rica donde se determina PSDA, se podría hipotetizar que estas metodologías podrían estar sub o sobre estimando los porcentajes de las fracciones arena, limo y arcilla, generando una gran incertidumbre sobre los resultados.

Estos potenciales errores tienen serias implicaciones en el manejo del recurso suelo, entre ellas: 1) diferencias considerables en la clasificación taxonómica del suelo, 2) errores en la asignación de la clase en el sistema de capacidad y uso conforme del suelo, y 3) discrepancias en la selección de tierras dedicadas a la producción de cultivos de gran importancia para el país (por ejemplo, el banano o la palma aceitera).

En adición, una determinación errónea de los porcentajes de arena limo y arcilla, podría alterar los resultados obtenidos por modelos hidrológicos (como Aquacrop o RETC) que utilizan ecuaciones de pedotransferencia para el cálculo indirecto de variables hidrológicas del suelo como la retención de humedad y la conductividad hidráulica en estado saturado K_s (van Genuchten *et al.* 1991, Steduto *et al.* 2009).

Por todo lo anterior, una revisión de los métodos de análisis para determinar PSDA y la clase textural del suelo se considera necesaria para la selección de métodos precisos y validados que se adapten a las necesidades de los laboratorios y los suelos de Costa Rica. El presente trabajo tiene como objetivo validar un método eficaz para el análisis de la distribución del tamaño de partículas y la determinación de la clase textural en suelos de Costa Rica. También se desarrollaron los siguientes objetivos específicos: 1) comparar la eficiencia de dos procedimientos en la dispersión de las muestras de suelo para mejorar la precisión del método; 2) contrastar el desempeño de tres metodologías de análisis de la distribución del tamaño de partículas para la determinación de la textura en suelos de Costa Rica, y 3) desarrollar un modelo de corrección para los valores de arena limo y arcilla obtenidos por los métodos evaluados, a partir de los valores correspondientes determinados mediante el método de referencia de la pipeta.

Materiales y métodos

Selección de sitios y muestreo de suelos

Para el desarrollo del presente estudio, se consultó información disponible sobre suelos muestreados y caracterizados por el Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (NRCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en Costa Rica. Dicha información está disponible de forma gratuita en una base de datos digital desarrollada por NCSS (2024), incluyendo los porcentajes de arena, limo y arcilla correspondientes a cada horizonte evaluado, los cuales fueron determinados mediante el método estandarizado de la pipeta (Soil Survey Staff 2022). Esta información se utilizó para la selección de perfiles y horizontes para el presente estudio (**Tabla 1**). Se seleccionó un total de 12 perfiles de suelo, distribuidos en distintas regiones de Costa Rica (**Figura 1**). En dichos perfiles, se colectaron tres bolsas de 2,5 kg de muestra alterada correspondientes a dos horizontes genéticos (en este caso, los horizontes A, B, y C), cuyas clases texturales conforman un grupo representativo dentro de las 12 clases que Schoeneberger *et al.* (2012) describen para suelos minerales.

Tabla 1. Características seleccionadas de los horizontes genéticos evaluados en el presente trabajo.

Table 1. Selected properties of the genetic soil horizons assessed in the present research.

Localización	Régimen de humedad	Horizonte	Profundidad (cm)	C (%)	Clase textural	Clasificación taxonómica	Latitud	Longitud
Bagatzi, Bagaces	Ústico	A _p	0-23	1,33	Arcilloso	Typic Haplusterts	10,3931	-85,3195
		B _{ssl}	23-53	0,88	Arcilloso			
Chicuá, Cartago	Údico	A _p	0-25	4,28	Franco arenoso	Humic Udivitrands	9,9477	-83,8678
Chinchilla, Cartago	Ústico	A _p	0-13	5,67	Arcilloso	Vertic Paleustalfs	9,8903	-83,8910
		B _{tl}	40+	0,98	Arcilloso			
INA, Perez Zeledón	Ústico	A _p	0-13	7,77	Arcilloso	Typic Acrustox	9,3500	-83,6861
		B _{t3}	75+	0,56	Arcilloso			
Instituto, Turrialba	Údico	A _p	0-18	3,27	Franco arcilloso	Typic Humudepts	9,9000	-83,6833
Irazú, Cartago	Údico	A _p	0-21	6,54	Franco arenoso	Typic Udipsamments	9,9733	-83,8600
Palmar, Puntarenas	Ústico	A _p	0-20	1,46	Franco	Fluvaquentic Haplustolls	10,0307	-84,7979
		B _{w1}	20-50	0,89	Franco			
		B _{w2}	61+	0,25	Franco limoso			
Potrero Cerrado, Cartago	Ústico	A _p	0-33	1,68	Franco	Humic Haplustands	9,9158	-83,8802
		B _{w1}	33-50	1,30	Franco			
		B _{w2}	50-75	1,07	Franco			
		B _{w3}	75+	0,75	Franco			
Santa Gertrudis, Alajuela	Ústico	B _{tl}	0-20	1,41	Franco arcilloso	Andic Palehumults	10,0712	-84,2740
		B _{t2}	20-50	0,68	Franco arcilloso			
		B _{t2}	50+	0,68	Franco arcilloso			
Termales, Alajuela	Údico	AB	0-16	2,37	Franco arcilloso	Humic Acrudox	10,3651	-84,3904
		B _{w1}	16-49	1,03	Arcilloso			
		B _{w2}	122-148	0,66	Arcilloso			
Termales Corte, Alajuela	Údico	A _b	120-145	0,49	Franco arcillo arenoso	Humic Acrudox	10,3650	-84,3903
Volcán, Pérez Zeledón	Ústico	A _p	0-25	3,18	Arcilloso	Typic Acrustox	9,2500	-83,5000
		B _{tl}	55+	0,31	Arcilloso			

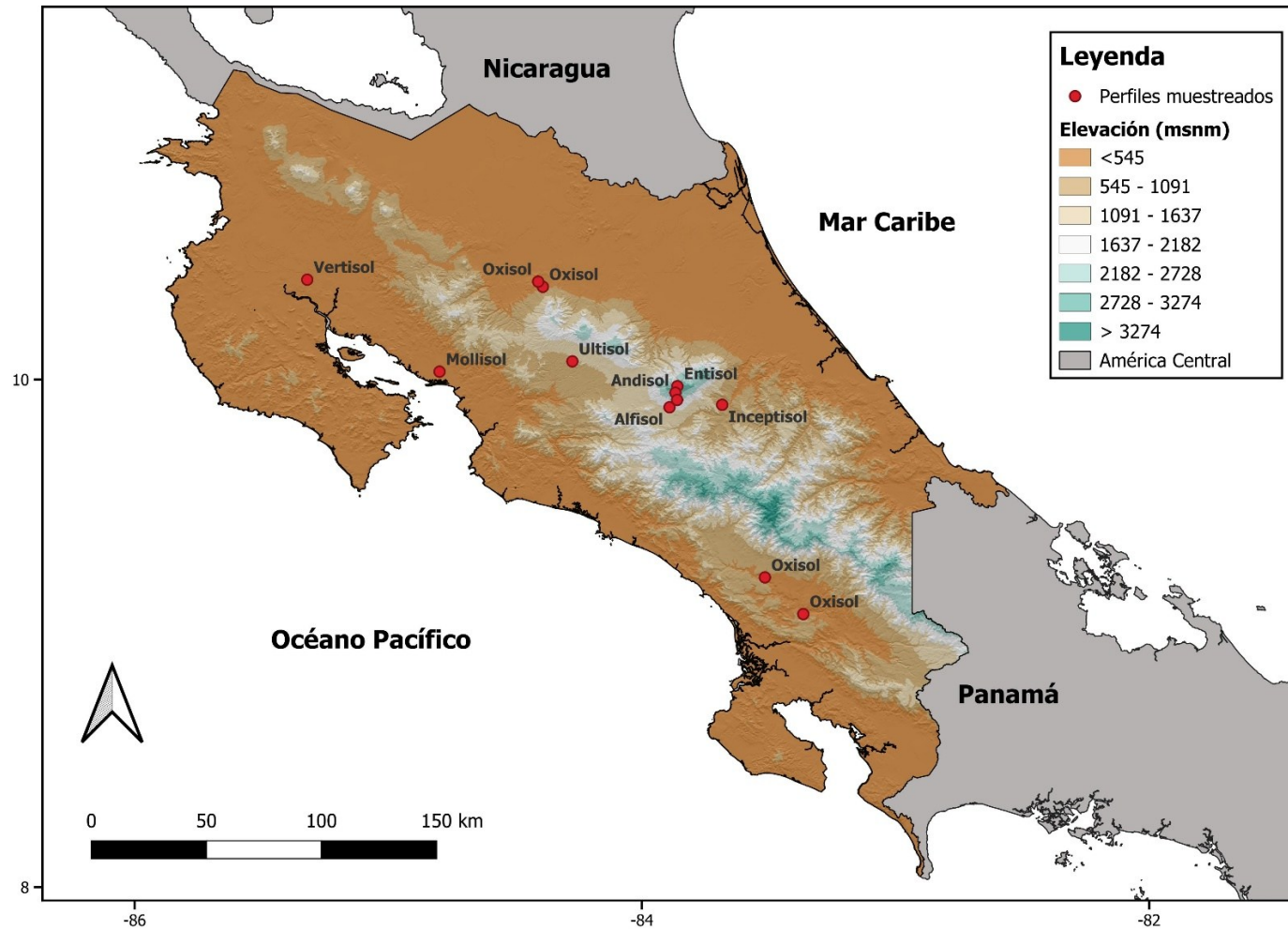


Figura 1. Modelo de elevación digital y localización de los doce perfiles evaluados y muestreados en el presente estudio.

Figure 1. Digital elevation model and geographic localization of the twelve pedons assessed and sampled in the present study.

Para la distinción de los horizontes genéticos A, B, y C en el campo, se evaluó las características morfológicas descritas en la base de datos anteriormente mencionada, la cual cuenta con información pertinente como la profundidad del horizonte, el color y la textura al tacto, las cuales se determinaron siguiendo los lineamientos descritos en Schoeneberger *et al.* (2012), lo que facilitó la identificación de estos horizontes en condiciones de campo.

Dichas muestras recolectadas se procesaron en el Laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas, en la Universidad de Costa Rica (LRN-CIA-UCR), donde se secaron al aire en un invernadero, a una temperatura promedio de 28 °C por un periodo de 10 días. Una vez verificado el estado de humedad de dichas muestras, estas se homogenizaron individualmente mediante un molino de cuchillas, junto con un tamiz con apertura de celda de 2 mm (muestras en condición de fracción de tierra fina). Una vez tamizadas, las muestras se almacenaron en bolsas plásticas del tipo ziplock debidamente rotuladas con los datos correspondientes a los horizontes.

Procedimientos de dispersión de la muestra de suelo

Se evaluaron dos métodos de dispersión de la muestra. Para ambos métodos se preparó una solución dispersante a base de sodio $[(\text{NaPO}_3)_6 + \text{Na}_2\text{CO}_3]$ según los lineamientos de Soil Survey Staff (2022), a la cual nos referiremos como “Calgón” en el presente trabajo. Dicho reactivo se preparó disolviendo 7,94 g de Na_2CO_3 (carbonato de sodio), y 35,7 g $(\text{NaPO}_3)_6$ (hexametáfosfato de sodio) en un litro de agua desionizada. Dicha solución se estandarizó siguiendo los procedimientos del Soil Survey Staff (2022) para garantizar la concentración del Calgón.

El primer método, consistió en la adición de 100 ml de Calgón a una masa de suelo de 40g (60 g si la muestra resulta muy arenosa al tacto) en un vaso de acero de 500 ml, con un reposo previo de 12 horas a la agitación, la cual se realizó mediante una batidora industrial de malteadas (HMD400R Series, Hamilton Beach®, North Carolina, USA) por un periodo de 5 minutos, siguiendo las recomendaciones de Soil Survey Staff (2022). El equipo se muestra en detalle en la **Figura 2A**.

El segundo método mantiene la adición de las mismas cantidades de solución dispersante y suelo, pero en este caso el suelo se contuvo en una botella de polietileno de 500 ml de capacidad y se agitó manualmente por unos segundos. Dicha muestra se dejó reposar por un par de horas, y posteriormente se le adicionó 100 ml de agua desionizada, y se agitó en un equipo oscilador horizontal (E6000, Eberbach®, Michigan, USA) por un periodo de 12 horas (toda la noche). El equipo se muestra en detalle en la **Figura 2B**.

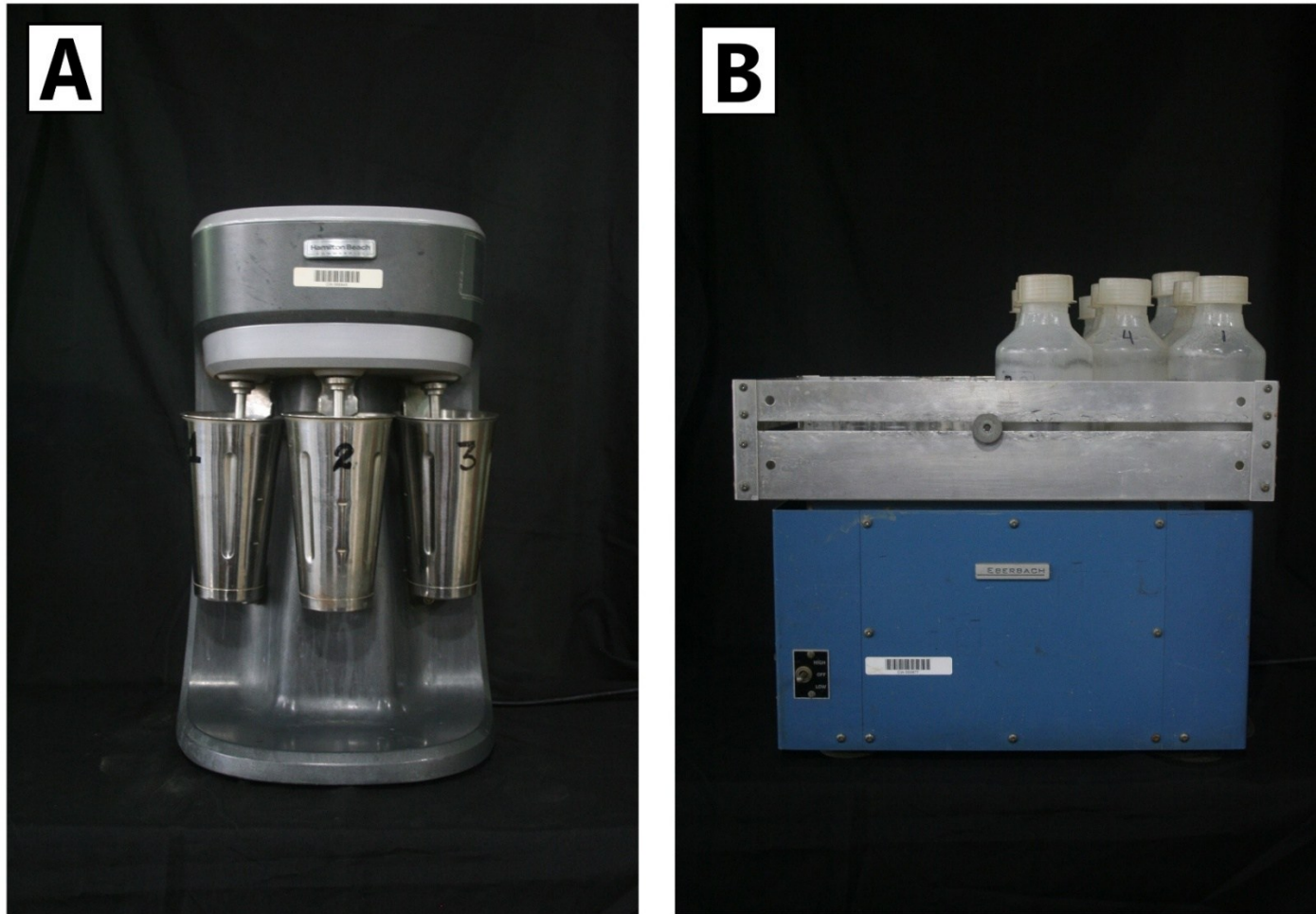


Figura 2. Métodos de dispersión mecánica de la muestra evaluados en el presente estudio: A) Batidora Industrial, B) Agitador horizontal.
Figure 2. Sample mechanical dispersion procedures assessed in present study: A) Industrial blender, B) Horizontal shaker.

Metodologías de análisis para la distribución del tamaño de partículas del suelo

En el presente trabajo, se evaluaron las siguientes metodologías de análisis para la determinación de la distribución del tamaño de partículas del suelo:

- 1) El método 1 (Bouyoucos): método del hidrómetro establecido por Bouyoucos (1927), considerado como un método pionero y de uso común en laboratorios de análisis de suelos en América Latina. Este método fue modificado y recalibrado, cuyos lineamientos se detallan en Bouyoucos (1951).
- 2) El método 2 (Bouyoucos T): método descrito por Henríquez y Cabalceta (1999), el cual tiene un carácter más didáctico, cuyos principios se basan en el procedimiento descrito por Bouyoucos (1962), donde se realizan correcciones empíricas por temperatura.
- 3) El método 3 (Bouyoucos M): método del hidrómetro modificado por Day (1956) y Casagrande (1934), en el cual se incluyen más tiempos de lectura y correcciones teóricas a los cálculos. Este método se describe en detalle por Gee y Or (2002) y se consideró por un largo periodo de tiempo (hasta el año 2014) como un método oficial de análisis de la textura del suelo por USDA-NRCS (Soil Survey Staff 2014).

Los porcentajes de arena limo y arcilla disponibles en la base de datos del NCSS (2024), fueron determinados por el método de la pipeta estandarizado 3A1a1a, en el cual se implementa un único pretratamiento rutinario de destrucción de materia orgánica mediante adiciones de H_2O_2 (Soil Survey Staff 2022). Pese a que en el suelo existen agentes que promueven la floculación de partículas (oxihidróxidos de Fe y Al, carbonatos), y que en el Soil Survey Staff (2022) se indican los pretratamientos correspondientes para su eliminación, los datos disponibles en NCSS (2024) no consideraron dichos pretratamientos. Los métodos evaluados en el presente trabajo tampoco consideran estos pretratamientos como un paso rutinario. Pese a que en Gee y Or (2002) se describen estos procedimientos de remoción de agentes floculantes, el método de análisis no los incluye como pasos de fundamentales.

Debido a que el objetivo del presente trabajo fue evaluar las tres metodologías anteriormente mencionadas, no se realizaron los pretratamientos descritos en Soil Survey Staff (2022) para las muestras analizadas, con miras a la evaluación de los métodos según fueron descritos.

Resumen del procedimiento de análisis de laboratorio

Previo al inicio del proceso dispersión, se recolectó una submuestra para determinar el porcentaje de humedad gravimétrica de la muestra de suelo (w) siguiendo los lineamientos de Topp y Ferré (2002). Se pesó 40 g de suelo en una balanza granataria mediante una bandeja plástica desechable. Si la muestra contiene un porcentaje de arena alto (determinado al tacto) se deben considerar 60 g de suelo. Dicha muestra se colocó en un recipiente dependiendo del método de dispersión evaluado (Botella de 500 ml o vaso de agitación de acero inoxidable).

Se agregó 100 ml de Calgón (y 100 ml de agua desionizada en el segundo procedimiento). Se agitó una sección de las muestras mediante un agitador horizontal durante toda la noche (12 h) y la otra sección mediante un batidor industrial por 5 minutos, siguiendo los lineamientos previamente descritos para los procedimientos de dispersión. Se trasvasó la muestra a un cilindro de sedimentación estandarizado (1000 ml TC 20 °C), se aforó con agua destilada a un litro y se dejó reposar por dos horas para equilibrar las muestras con la temperatura del entorno (ambiente).

Se realizó una solución “blanco” en un cilindro de sedimentación, en el cual se adicionó solamente 100 ml de Calgón y se aforó a un litro con agua destilada. Con un émbolo de agitación se homogenizó la muestra durante 30 s antes de iniciar el tiempo de lectura. Se colocó el hidrómetro en el cilindro de sedimentación y se realizaron mediciones a los 40 segundos y 2 h en el caso de los métodos de Bouyoucos (1927) y Henríquez y Cabalceta (1999). Mientras que para el método descrito por Gee y Or (2002) se realizaron mediciones a los 30 segundos, 1 minuto, 6 y 24 h.

En cada lectura realizada, se retiró el hidrómetro, se enjuagó en agua desionizada y se secó con papel toalla desechable. Se registró la temperatura de las muestras y el blanco en los tiempos respectivos de lectura. Con los datos anteriores, se construyó una base de datos en Excel, para facilitar el cálculo de los porcentajes de arena limo y arcilla para cada metodología de análisis evaluada.

Estimación de los porcentajes de las fracciones de partículas

La estimación de los porcentajes de arena, limo y arcilla se realizó en función del método evaluado. Un aspecto importante por considerar es la inclusión de una corrección por blanco en las metodologías 1 y 2, debido a que la cantidad del Calgón utilizada puede incrementar la lectura del hidrómetro hasta en 5 g L⁻¹ dependiendo del valor de temperatura. Si bien, las metodologías originales (Bouyoucos 1951, Henríquez y Cabalceta 1999) no consideraron dicha corrección en los cálculos, en el presente trabajo se incluyeron para evitar resultados adulterados.

Para la metodología 1 se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$Arena(\%) = \left[(M - R_{40s} - R_L) / M \right] * 100 \quad [1]$$

$$Arcilla(\%) = \left[(R_{2h} - R_L) / M \right] * 100 \quad [2]$$

$$Limo(\%) = 100 - Arcilla(\%) - Arena(\%) \quad [3]$$

Donde R_{40s} es la lectura del hidrómetro a los 40 segundos ($g L^{-1}$), R_{2h} es la lectura del hidrómetro a las 2 horas ($g L^{-1}$), R_L es la lectura del blanco ($g L^{-1}$) correspondientes a las lecturas del hidrómetro los mismos tiempos previamente mencionados, y M es la masa de la muestra (40 g, o 60 g si la muestra es arenosa o franco arenosa al tacto).

Para la metodología 2 se hace una corrección por temperatura a la lectura del hidrómetro (Bouyoucos 1962, Henríquez y Cabalceta 1999), la cual se realiza de la siguiente forma:

$$R_c = \begin{cases} Si T > 19,4^{\circ}C \rightarrow R + [(T - 19,4) * 0,3] \\ Si T < 19,4^{\circ}C \rightarrow R - [(T - 19,4) * 0,3] \end{cases} \quad [4]$$

Donde R_c es la lectura corregida ($g L^{-1}$) según el valor de la temperatura T ($^{\circ}C$) correspondiente a la lectura del hidrómetro R ($g L^{-1}$).

Posteriormente, el cálculo de los porcentajes se realizó mediante las siguientes ecuaciones:

$$Arena(\%) = \left[(M - R_{c40s} - R_L) / M \right] * 100 \quad [5]$$

$$Arcilla(\%) = \left[(R_{c2h} - R_L) / M \right] * 100 \quad [6]$$

$$Limo(\%) = 100 - Arcilla(\%) - Arena(\%) \quad [7]$$

Donde R_{c40s} es la lectura corregida ($g L^{-1}$) del hidrómetro a los 40 segundos, R_{c2h} es la lectura corregida ($g L^{-1}$) del hidrómetro a las 2 horas.

Finalmente, para la metodología 3 se realizaron los cálculos mediante las siguientes funciones asociadas a la determinación del diámetro de partícula y la concentración correspondiente.

Para la estimación del diámetro efectivo de partículas X (μm) correspondiente a un tiempo de lectura t se consideró la siguiente ecuación:

$$X = \theta t^{-0,5} = 1000 \left[\frac{30\eta h'}{g(\rho_s - \rho_l)} \right]^{0,5} * t^{-0,5} \quad [8]$$

Donde t es el tiempo de sedimentación (minutos), η es la viscosidad del fluido ($\text{g cm}^{-1} \text{s}^{-1}$), ρ_s es la densidad de partículas del suelo (g cm^{-3}) y ρ_l densidad de partículas de la solución agua más dispersante (g cm^{-3}), g es el valor de la aceleración debida a la gravedad (980 cm s^{-2}) y h' es la profundidad efectiva de inmersión del hidrómetro, la cual se puede calcular para un hidrómetro estandarizado (ASTM 152H; Bouyoucos scale) mediante la siguiente fórmula:

$$h' = -0,164R + 16,3 \quad [9]$$

Donde R es la lectura del hidrómetro a un tiempo t .

La concentración de partículas en suspensión para un tiempo t se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$C = R - R_L \quad [10]$$

Donde C es la concentración (g L^{-1}) corregida por la solución blanco R_L , a partir de la lectura del hidrómetro R .

Finalmente, el porcentaje acumulativo de partículas en suspensión P a un tiempo t se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$P = \left(C/C_0 \right) * 100 = \left(R - R_L / M_s \right) * 100 \quad [11]$$

Donde C_0 es la masa de sólidos del suelo (M_s) en un litro de disolución.

La masa de sólidos se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$M_s = \frac{M}{1 + w} \quad [12]$$

Donde M_s es la masa de sólidos, M es la masa de muestra, y w es la humedad gravimétrica del suelo, determinada siguiendo los lineamientos de Topp & Ferré (2002).

Finalmente, estos cálculos se realizaron para las lecturas del hidrómetro realizadas en los tiempos 0,5 y 1 minuto para la estimación de las arenas, y las lecturas realizadas a los tiempos 360 y 1440 minutos (6 y 24 h), obteniendo los correspondientes valores X y P , generando las siguientes matrices:

$$\begin{bmatrix} 0,5 & X_1 & P_1 \\ 1 & X_2 & P_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 360 & X_3 & P_3 \\ 1440 & X_4 & P_4 \end{bmatrix}$$

Con estos valores se interpoló el porcentaje acumulativo correspondiente a las 50 y 2 μm mediante una regresión lineal con transformación \log_{10} en P , mediante las siguientes fórmulas:

$$m_1 = \frac{\log_{10} P_2 - \log_{10} P_1}{X_2 - X_1} \quad m_2 = \frac{\log_{10} P_4 - \log_{10} P_3}{X_4 - X_3} \quad [13]$$

$$b_1 = \log_{10} P_2 - m_1 * X_2 \quad b_2 = \log_{10} P_4 - m_2 * X_4 \quad [14]$$

$$P_{interpolado} \begin{cases} P_{50} = 10^{(m_1 * 50 + b_1)} \\ P_2 = 10^{(m_2 * 2 + b_2)} \end{cases} \quad [15]$$

Donde m_1 y m_2 son las pendientes; b_1 y b_2 son los valores de intercepto correspondientes a las dos matrices; P_{50} y P_2 representan los porcentajes acumulativos correspondientes a 50 micras (límite inferior del limo) y 2 micras (límite inferior de la arcilla).

Finalmente, el cálculo de los porcentajes se realizó mediante las siguientes ecuaciones:

$$Arena(\%) = 100 - P_{50} \quad [16]$$

$$Arcilla(\%) = P_2 \quad [17]$$

$$Limo(\%) = 100 - Arcilla(\%) - Arena(\%) \quad [18]$$

Diseño experimental

En el presente trabajo se evaluaron 12 perfiles de suelo, con dos horizontes cada uno, para un total de 24 muestras utilizadas como unidad experimental. En estas muestras se evaluaron dos métodos de dispersión como primer factor, y se comparó el desempeño de tres metodologías para el análisis de la distribución del tamaño de partículas del suelo como segundo factor, utilizando un diseño experimental completamente aleatorizado (CRD, por sus siglas en inglés). Se realizaron tres repeticiones por muestra para cada método de dispersión, lo que resultó en un total de 144 análisis.

Análisis de los datos y métodos estadísticos

Se realizó una regresión lineal con los resultados obtenidos para las fracciones de arcilla y arena estimadas por cada método evaluado como variables dependientes (y), en la que los correspondientes valores obtenidos por el método de la pipeta (NCSS 2024) se utilizaron como variables independientes (x). Dichos modelos se ajustaron a la siguiente ecuación:

$$y_{Ai} = mx_{Aij} + b \quad [19]$$

$$y_{ai} = mx_{aij} + b \quad [20]$$

Donde y_{Ai} y y_{ai} corresponden respectivamente a los valores de las fracciones arcilla (A) y arena (a) estimados con el método i ; las variables x_{Aij} y x_{aij} representan de forma respectiva los valores correspondientes de las fracciones arcilla (A) y arena (a) determinados con el método de la pipeta j ; m es la pendiente del modelo y b el intercepto ($x=0$). El desempeño de los modelos de regresión fue evaluado mediante el error cuadrático medio (ECM) o RMSE por sus siglas en inglés; el índice de concordancia de Willmott (d) y el índice de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE), los cuales se calcularon utilizando las siguientes ecuaciones:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - s_i)^2}{n}} \quad [21]$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - s_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|s_i - o_a| + |o_i - o_a|)^2} \quad [22]$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - s_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - o_a)^2} \quad [23]$$

Donde o_i corresponde al valor observado para el punto de datos i , s_i al valor simulado para ese mismo punto, y o_a al valor promedio de las observaciones.

Todos estos procedimientos anteriormente mencionados se realizaron utilizando el programa estadístico R Studio (R v. 4.0.4, 2021-02-15) “Lost Library Book” (R Studio Team 2015).

Resultados

Efecto del método de análisis y procedimiento de dispersión en la textura del suelo

En la **Figura 3** se resume la concordancia entre los valores de arcilla obtenidos con los distintos métodos de análisis y los obtenidos con el método de referencia de la pipeta, bajo dos procedimientos de dispersión. Para la técnica de dispersión con batidora industrial, los métodos Bouyoucos, Bouyoucos T, y Bouyoucos M presentaron pendientes de 0,86, 0,86 y 0,88, respectivamente, con valores de intercepto de 3,33; 6,02 y -4,00. Estas cifras indican una sobreestimación de esta fracción en suelos con porcentajes bajos de arcilla, así como una subestimación en suelos con porcentajes altos de dicha fracción por parte del método Bouyoucos. Por su parte, en la metodología Bouyoucos T, presentó un comportamiento inverso, pues subestima cuando el contenido de arcilla es bajo y sobreestima cuando dicho contenido resulta alto. El método Bouyoucos M, de forma general subestima el contenido de arcillas (**Figura 3**). Los valores de R^2 de los modelos oscilaron entre 0,92 y 0,94, con significancia estadística ($p < 0,001$).

Por otro lado, al evaluar el procedimiento de dispersión con agitador horizontal, los métodos Bouyoucos y Bouyoucos T presentaron pendientes de 0,89, con valores de intercepto de 9,53 y 12,25, respectivamente, lo que indica una tendencia a la sobreestimación del porcentaje de arcilla (**Figura 3**). El método Bouyoucos M, en combinación con el agitador horizontal, presentó el modelo con mejor ajuste con respecto al método de la pipeta, con una pendiente de 0,90, valores de R^2 e intercepto de 0,92 y 1,66, respectivamente, así como significancia estadística ($p < 0,001$). Estos valores anteriores, (en adición a la similitud con la línea de mejor ajuste 1:1) indican que el método Bouyoucos M puede considerarse como la alternativa más precisa entre las evaluadas para la determinación de la fracción arcilla.

De forma similar, en la **Figura 4** se detalla la concordancia entre los resultados de la fracción arena. Se obtuvo como resultado, una sobreestimación general del porcentaje de arena al utilizar la batidora industrial como procedimiento de dispersión, indiferentemente del método de análisis. En adición, se observó subestimaciones cuando el porcentaje arena superaba el 50% (**Figura 4**).

Las pendientes obtenidas para los métodos Bouyoucos, Bouyoucos T y Bouyoucos M fueron de 0,71, 0,72 y 0,83, respectivamente, con valores de intercepto de 17,0, 14,7 y 10,9. Los valores de R^2 obtenidos para los modelos de regresión oscilaron entre 0,78 y 0,84, con significancia estadística ($p < 0,001$).

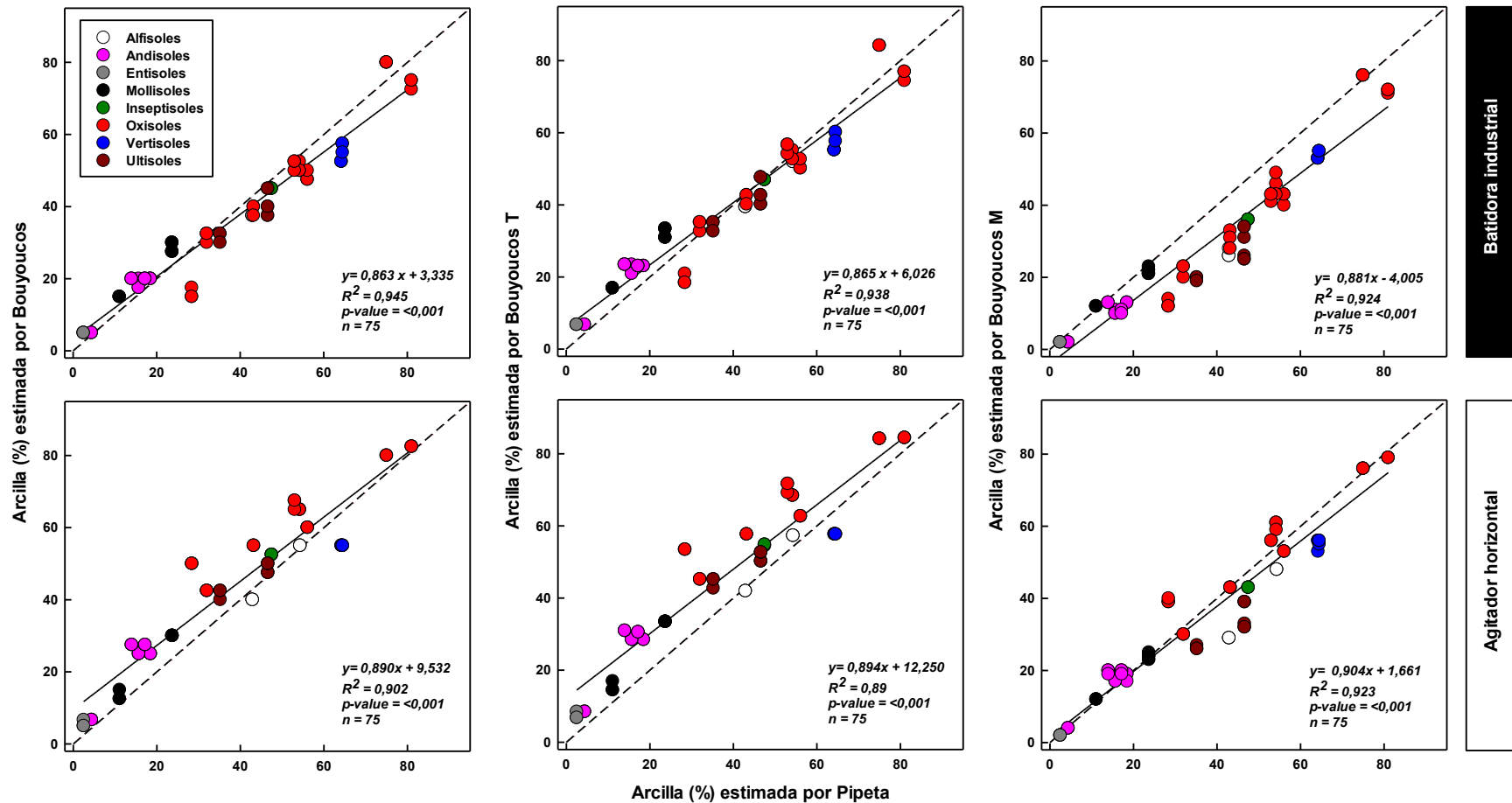


Figura 3. Relación entre los valores de la fracción arcilla del suelo obtenidos con el método de referencia (pipeta) y con tres métodos de análisis bajo dos procedimientos de dispersión, en órdenes de suelo de Costa Rica. Línea sólida en color negro representa el modelo de mejor ajuste. Línea discontinua representa la relación 1:1. Paneles horizontales negro y blanco representan los dos procedimientos de dispersión.

Figure 3. Relationship between soil clay fraction values obtained with the reference method (pipette) and three analytical methods under two dispersion procedures, across soil orders of Costa Rica. The solid black line represents the best-fit model, while the dashed line represents the 1:1 relationship. Black and white horizontal panels correspond to the two dispersion procedures.

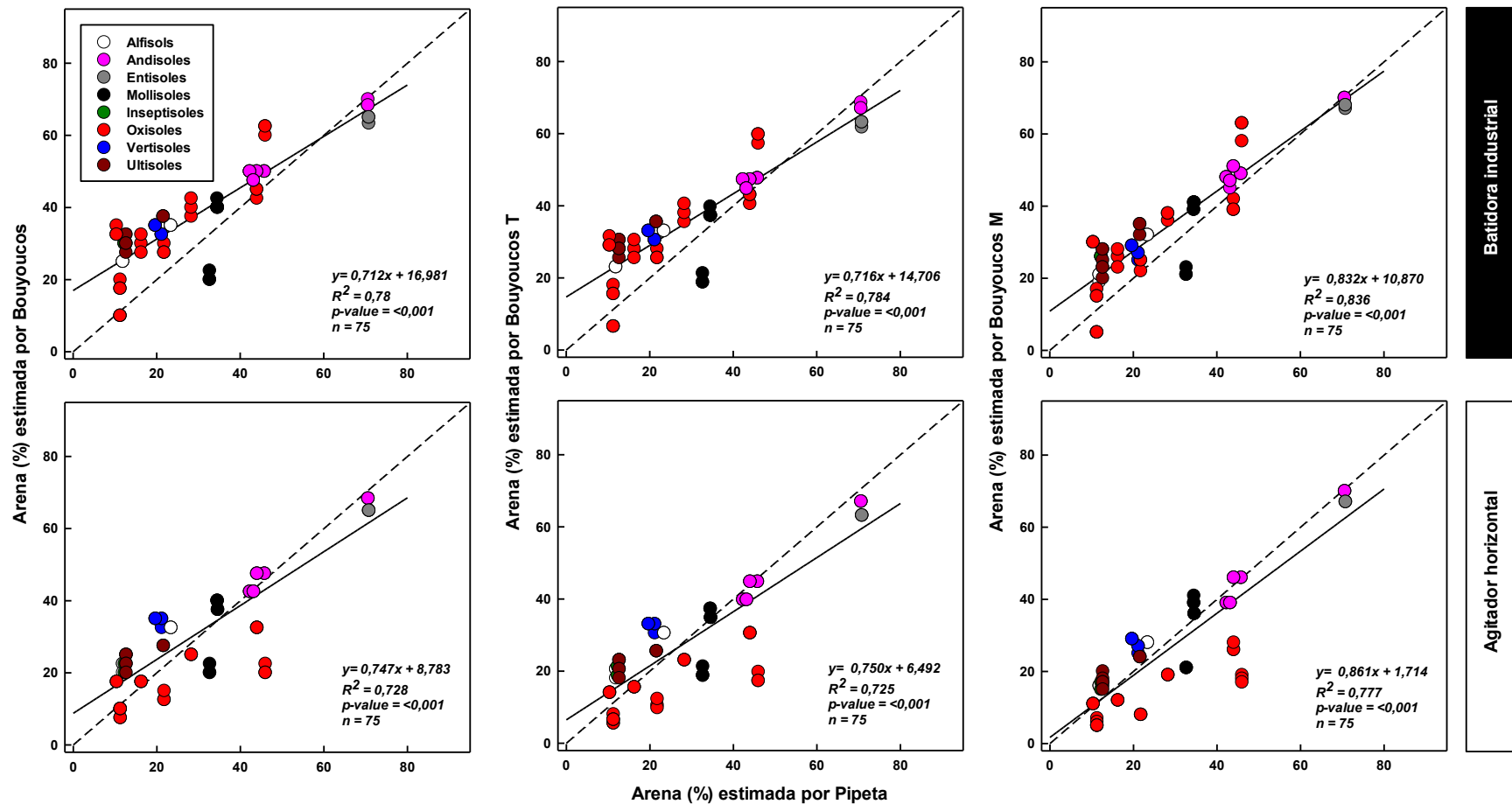


Figura 4. Relación entre los valores de la fracción arena del suelo obtenidos con el método de referencia (pipeta) y con tres métodos de análisis bajo dos procedimientos de dispersión, en órdenes de suelo de Costa Rica. Línea sólida en color negro representa el modelo de mejor ajuste. Línea discontinua representa la relación 1:1. Paneles horizontales negro y blanco representan los dos procedimientos de dispersión.

Figure 4. Relationship between soil sand fraction values obtained with the reference method (pipette) and three analytical methods under two dispersion procedures, across soil orders of Costa Rica. The solid black line represents the best-fit model, while the dashed line represents the 1:1 relationship. Black and white horizontal panels correspond to the two dispersion procedures.

Por otro lado, al evaluar el uso del agitador horizontal como procedimiento de dispersión, los métodos Bouyoucos y Bouyoucos T demostraron tener una mayor discrepancia respecto al método de referencia, con valores respectivos de intercepto de 8,8 y 6,5, y pendientes de 0,75, lo que refleja una evidente sobreestimación en bajos valores de arena y una subestimación al incremental el contenido de esta fracción (valores mayores al 30%). En contraste, el método Bouyoucos M presentó una mayor similitud con los valores obtenidos por el método de la pipeta, con un valor de intercepto de 1,7, una pendiente de 0,86 y un valor de R^2 de 0,78, lo que sugiere un mejor ajuste y una mayor relación con los valores de referencia (**Figura 4**).

En cuanto al porcentaje de la fracción limo de los suelos evaluados, este no fue considerado en los análisis de datos, ya que se calcula por diferencia entre el 100% y los porcentajes correspondientes de las fracciones de arcilla y arena. Por lo tanto, los valores de mayor interés en este análisis para esta etapa fueron los de arcilla y arena, con el objetivo de ajustar el modelo y tomar las consideraciones necesarias para la modificación y selección de la metodología más adecuada.

Estas diferencias observadas en los porcentajes de las fracciones para cada método y procedimiento de dispersión evaluados tuvieron su efecto en la asignación de la clase textural del suelo, como se observa en las **Figuras 5 y 6**. Los métodos Bouyoucos y Bouyoucos T bajo el procedimiento de dispersión batidora industrial (representados por círculos ●) presentaron una desviación considerable con respecto a las correspondientes clases texturales reportadas para los valores del método de referencia (representados por triángulos ▼), especialmente en las texturas más arcillosas (**Figura 5**). Por otro lado, el método Bouyoucos M demostró un mayor acercamiento a los datos de referencia cuando se utiliza la batidora industrial como método de dispersión. Sin embargo, la subestimación del contenido de arcilla observada anteriormente (**Figura 3**) también se reflejó en variaciones de las correspondientes clases texturales (**Figura 5**).

De forma similar, en la **Figura 6** se observa el efecto de los métodos de análisis bajo el procedimiento del agitador horizontal sobre la distribución de los datos obtenidos para las fracciones arcilla, limo y arena y su correspondiente clase textural. Se observó un mejor ajuste de las clases texturales al utilizar los métodos Bouyoucos y Bouyoucos T, en comparación con los correspondientes métodos bajo el procedimiento de la batidora industrial (**Figura 5**). Sin embargo, el método que presentó el mejor desempeño para la asignación de la clase textural fue nuevamente Bouyoucos M, el cual se aproximó con mayor precisión a las clases obtenidas por la pipeta (representados por triángulos ▼) en la mayoría de los órdenes de suelo (señalados con círculos de color según el orden de suelo).

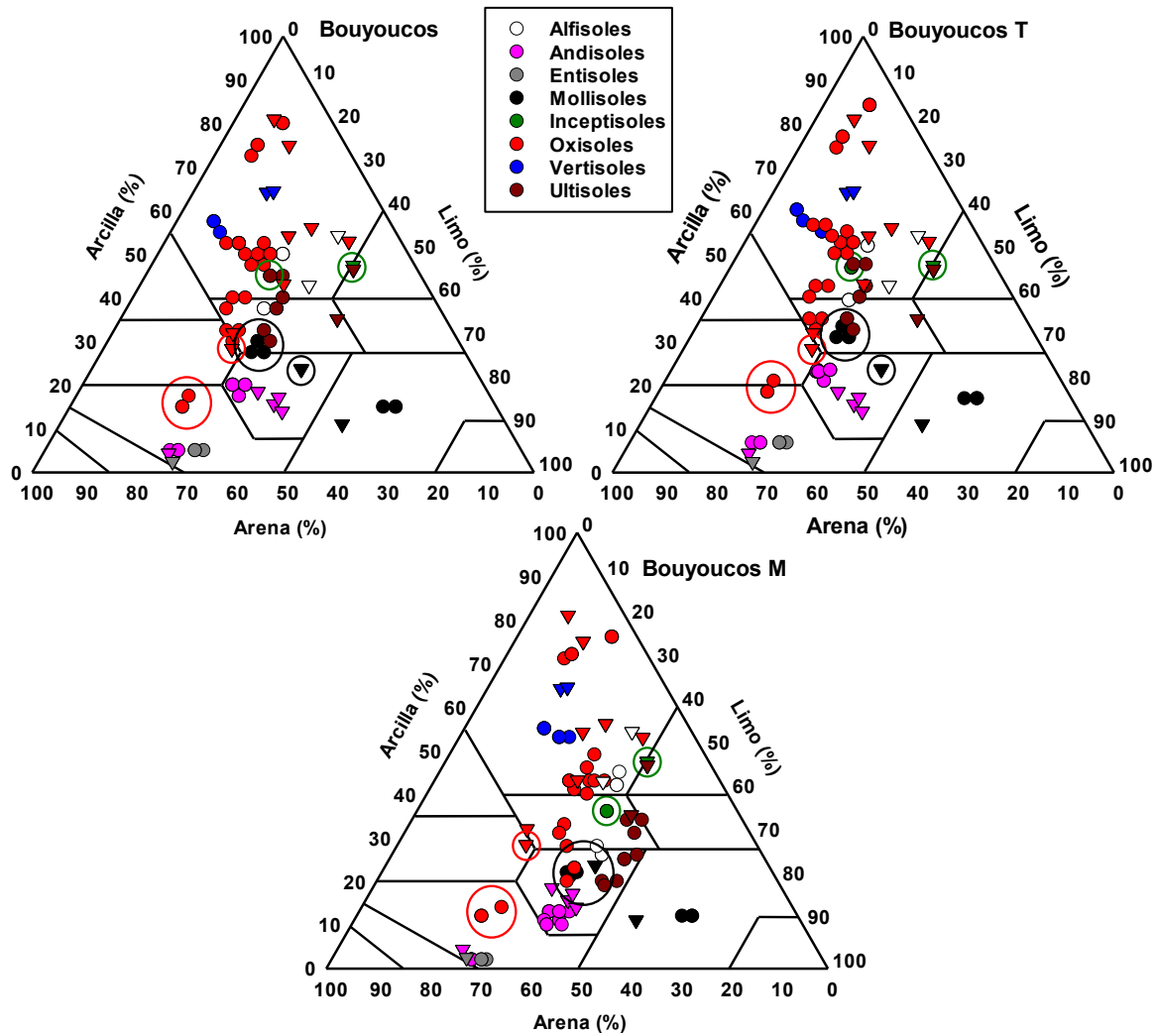


Figura 5. Efecto de tres métodos de análisis bajo el procedimiento de dispersión de la batidora industrial, en la determinación de la clase textural en órdenes de suelo de Costa Rica. Los triángulos invertidos (▼) representan los datos obtenidos mediante el método de pipeta (referencia), mientras que los círculos (●) representan los correspondientes valores obtenidos mediante cada uno de los métodos evaluados. Círculos del mismo color separados dentro del triángulo indica diferencias en clases texturales. Un único círculo del mismo color dentro del triángulo denota concordancia en la clase textural.

Figure 5. Effect of three analytical methods under the dispersion procedure using an industrial blender on the determination of soil textural class in soil orders of Costa Rica. Inverted triangles (▼) represent data obtained with the pipette method (reference), while circles (●) represent the corresponding values obtained with each of the evaluated methods. Separated circles of the same color within the triangle indicate differences in textural classes, whereas a single circle of the same color denotes agreement in textural class.

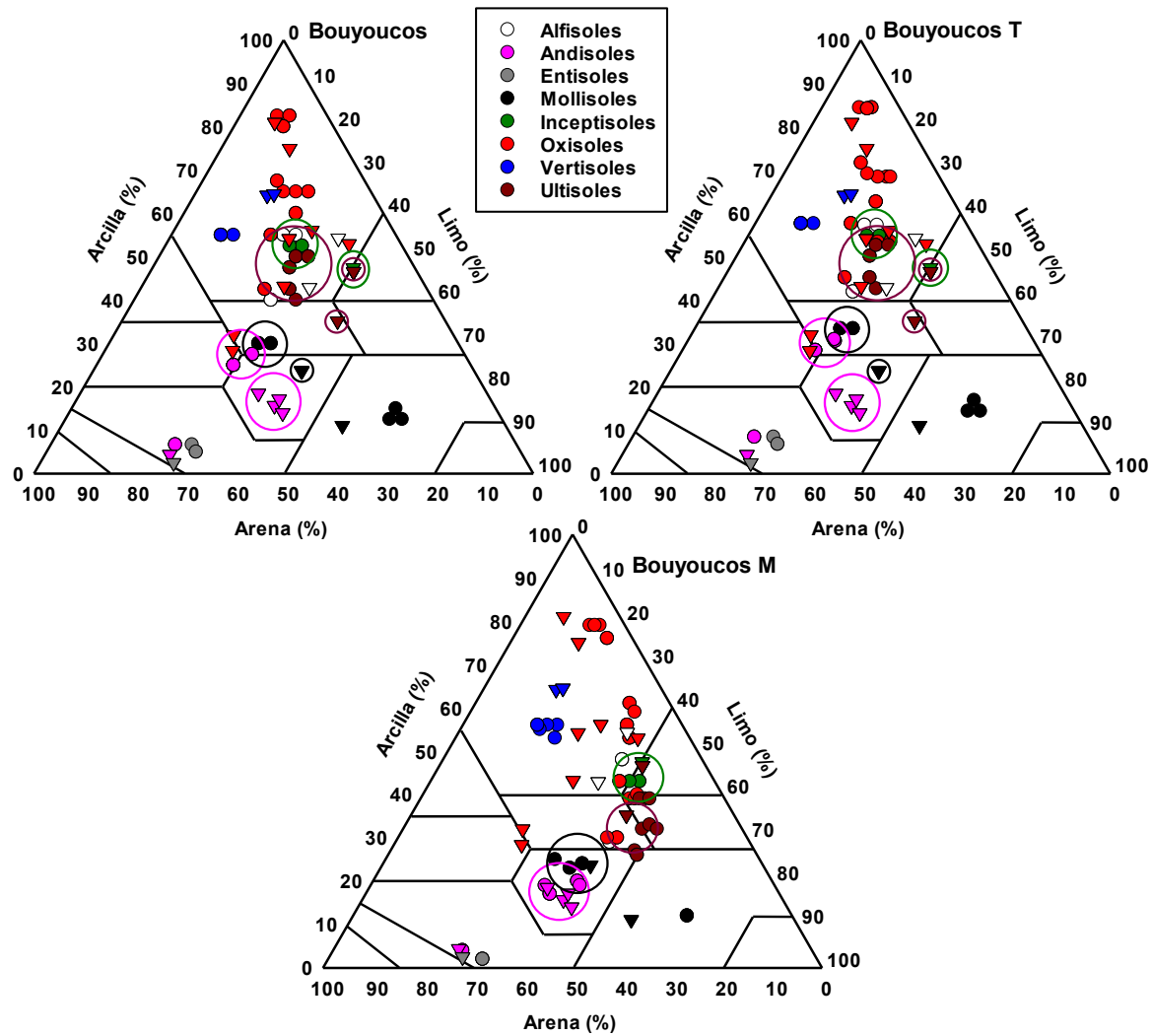


Figura 6. Efecto de tres métodos de análisis bajo el procedimiento de dispersión del agitador horizontal, en la determinación de la clase textural en órdenes de suelo de Costa Rica. Los triángulos invertidos (▼) representan los datos obtenidos mediante el método de pipeta (referencia), mientras que los círculos (●) representan los correspondientes valores obtenidos mediante cada uno de los métodos evaluados. Círculos del mismo color separados dentro del triángulo indica diferencias en clases texturales. Un único círculo del mismo color dentro del triángulo denota concordancia en la clase textural.

Figure 6. Effect of three analytical methods under the dispersion procedure using an industrial blender on the determination of soil textural class in soil orders of Costa Rica. Inverted triangles (▼) represent data obtained with the pipette method (reference), while circles (●) represent the corresponding values obtained with each of the evaluated methods. Separated circles of the same color within the triangle indicate differences in textural classes, whereas a single circle of the same color denotes agreement in textural class.

De forma general, el método Bouyoucos M bajo un procedimiento de dispersión con agitador horizontal presentó un desempeño superior a los otros dos métodos de análisis, obteniendo resultados que se aproximaron considerablemente y de forma significativa a los correspondientes obtenidos por el método de referencia de la pipeta (**Figuras 4 y 6**).

Corrección por humedad de la muestra y su efecto en la determinación de la textura

Un aspecto importante que se omite en la mayoría de los laboratorios de análisis físicos del suelo es el estado de humedad de la muestra, la cual normalmente se asume un porcentaje de 0 (suelo con masa constante). Este efecto del contenido de humedad se evaluó en el presente trabajo para el método con el mejor desempeño (Bouyoucos M) bajo ambos procedimientos de dispersión, y cuyos resultados correspondientes a las fracciones de arcilla y arena, se resumen en las **Figuras 7 y 8**.

Al considerar la corrección por humedad de la muestra en los cálculos, se observó una mayor similitud entre los valores de arcilla obtenidos por Bouyoucos M (y agitador horizontal) y los correspondientes obtenidos por el método de la pipeta (**Figura 7**). Esta similitud se observó tanto de forma numérica, con un valor de intercepto de 1,66, una pendiente de 0,90 y un valor de R^2 de 0,96; con mayor concordancia con la línea de mejor ajuste y la línea 1:1, al compararlo con los valores sin corrección por humedad (**Figura 7**).

Un comportamiento similar se observó al evaluar el efecto de la corrección por humedad de la muestra en la determinación de la fracción arena (**Figura 8**). Nuevamente, los valores obtenidos con el método de Bouyoucos M bajo el procedimiento de dispersión agitador horizontal presentaron la mayor similitud con los obtenidos por el método de la pipeta, cuando se corrige por la humedad de muestra del suelo. El modelo de regresión correspondiente a esta corrección presentó un valor de intercepto de 1,7, una pendiente de 0,86 y un valor de R^2 de 0,78, con significancia estadística ($p < 0,001$).

Curiosamente, los modelos de regresión ajustados para los datos obtenidos con y sin la corrección por humedad de la muestra bajo el procedimiento de dispersión batidora industrial, presentaron valores de intercepto entre 10,8 y 16,8 (**Figura 8**) lo que sugiere una sobreestimación del contenido de la fracción arena en comparación con los valores obtenidos con el método de referencia.

Los resultados anteriores demostraron la necesidad de considerar tanto el procedimiento de dispersión como la humedad de la muestra en los cálculos para la determinación de las fracciones de arena y arcilla, ya que mediante el método Bouyoucos M bajo el procedimiento de dispersión del agitador horizontal (considerado como el más eficaz) en suelos de Costa Rica, los resultados presentaron mayor concordancia con los obtenidos con el método de referencia.

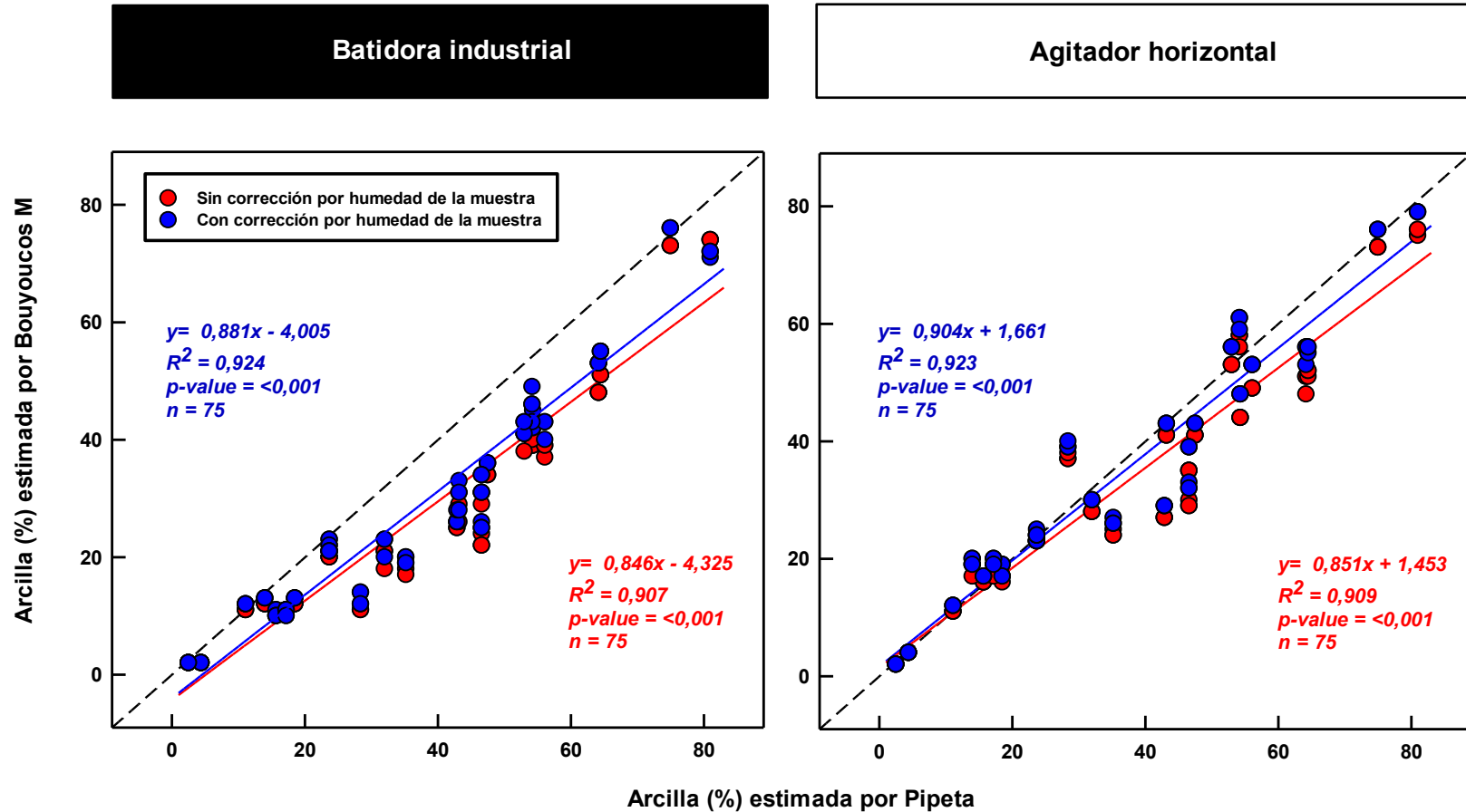


Figura 7. Efecto de la corrección por humedad de la muestra en la determinación de la fracción arcilla del suelo obtenida con el método Bouyoucos M bajo dos procedimientos de dispersión, en órdenes de suelo de Costa Rica. Valores estimados de arcilla se compararon con sus valores correspondientes obtenidos por el método de referencia (Pipeta). Línea discontinua representa la relación 1:1. Líneas sólidas en color rojo y azul representan los modelos de mejor ajuste. Paneles verticales negro y blanco representan los dos procedimientos de dispersión.

Figure 7. Effect of sample moisture correction on the determination of the soil clay fraction obtained with the Bouyoucos M method under two dispersion procedures, across soil orders of Costa Rica. Estimated clay values were compared with the corresponding values obtained with the reference method (pipette). The dashed line represents the 1:1 relationship. Solid red and blue lines represent the best-fit models. Black and white vertical panels correspond to the two dispersion procedures.

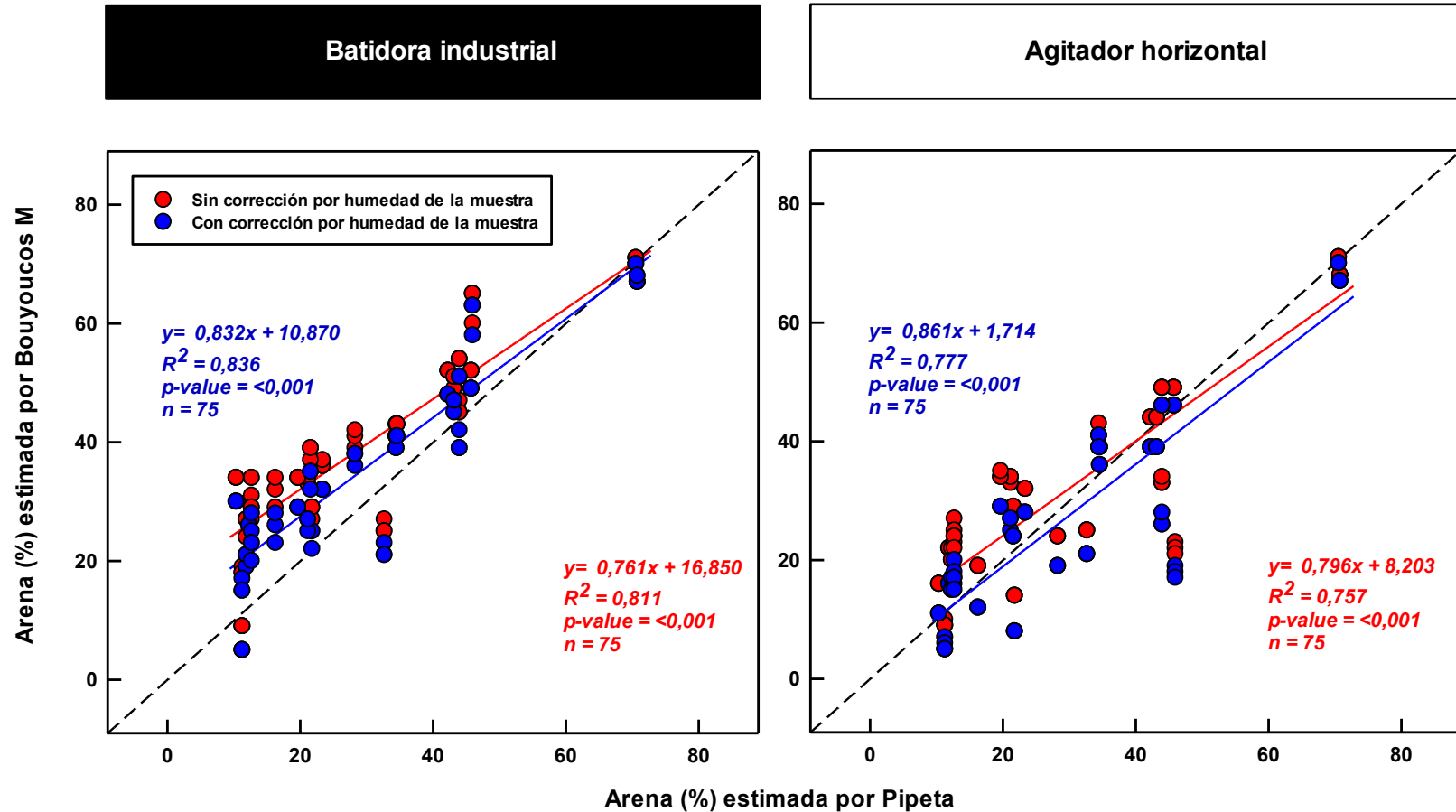


Figura 8. Efecto de la corrección por humedad de la muestra en la determinación de la fracción arena del suelo obtenida con el método Bouyoucos M bajo dos procedimientos de dispersión, en órdenes de suelo de Costa Rica. Valores estimados de arena se compararon con sus valores correspondientes obtenidos por el método de referencia (Pipeta). Línea discontinua representa la relación 1:1. Líneas sólidas en color rojo y azul representan los modelos de mejor ajuste. Paneles verticales negro y blanco representan los dos procedimientos de dispersión.

Figure 8. Effect of sample moisture correction on the determination of the soil sand fraction obtained with the Bouyoucos M method under two dispersion procedures, across soil orders of Costa Rica. Estimated sand values were compared with the corresponding values obtained with the reference method (pipette). The dashed line represents the 1:1 relationship. Solid red and blue lines represent the best-fit models. Black and white vertical panels correspond to the two dispersion procedures.

Evaluación de la separación mecánica de la fracción arena por medio del tamizado

Un aspecto importante, es la separación mecánica de la fracción arena mediante tamiz en el método de la pipeta, y su posterior estimación por gravimetría. Esto genera la interrogante sobre la necesidad de incluir un paso de determinación directa mediante el tamizado con el objetivo de incrementar la precisión en la determinación de la fracción de arena. En el presente trabajo, se evaluó la inclusión de este paso y se determinó el contenido de arena por tamizado, y se contrastó con los valores obtenidos tanto por el método de la pipeta, como el método de Bouyoucos M bajo ambos procedimientos de dispersión.

En la **Figura 9** se resume la variabilidad obtenida para la determinación de la fracción arena, tanto de manera directa como utilizando el método de Bouyoucos M. Al evaluar el procedimiento de dispersión de la batidora industrial, la determinación directa de arena por tamizado subestima el porcentaje de esta fracción, con un valor de intercepto de -0,43, una pendiente de 0,83 y un valor de R^2 de 0,68 ($p < 0,001$).

De forma contraria, el método de Bouyoucos M presentó una tendencia a sobrestimar los valores de la fracción arena. Dicha sobreestimación es evidente, tanto de forma numérica (un valor de intercepto de 10,87) como de forma gráfica (una mayor concordancia entre la línea de mejor ajuste y la línea 1:1). Este modelo de regresión (línea de mejor ajuste) presentó significancia estadística ($p < 0,001$). Por otro lado, el procedimiento de dispersión agitador horizontal reportó los valores más cercanos a los obtenidos con el método de referencia, tanto al utilizar el método de Bouyoucos M como con la determinación directa por tamizado (**Figura 9**). Si bien, ambos enfoques presentaron significancia estadística ($p < 0,001$) y sus valores de pendiente fueron similares, los valores de intercepto y la concordancia entre las líneas de mejor ajuste y la línea 1:1 sugieren un mejor desempeño del método Bouyoucos M.

Los resultados anteriores indican que no sería conveniente incluir un paso de determinación directa por tamizado dentro de la rutina de análisis de PSDA, esto debido a las potenciales implicaciones prácticas y un esfuerzo adicional dentro de una rutina de análisis la cual puede inducir a más errores.

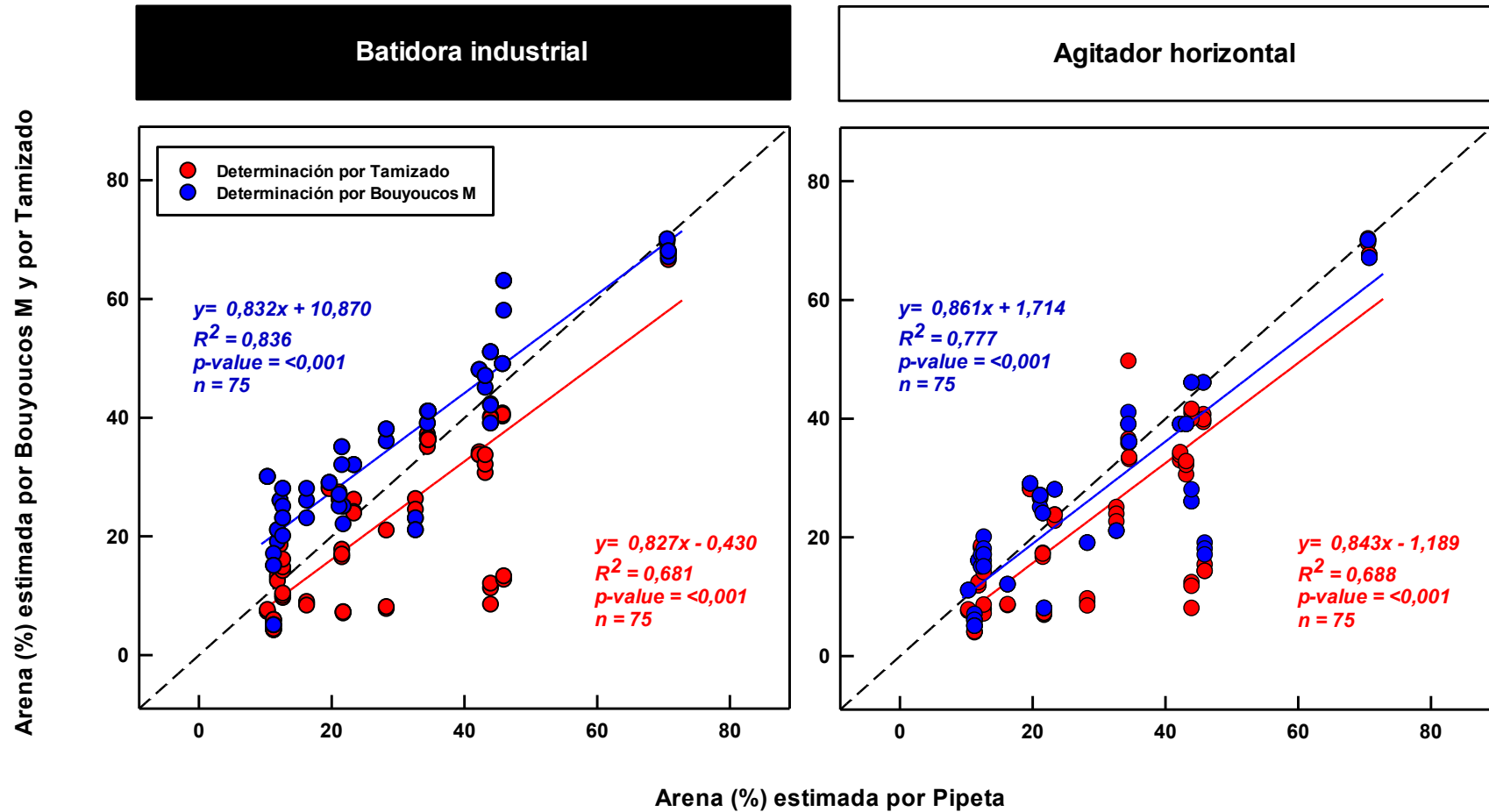


Figura 9. Comparación entre la determinación de la fracción arena por tamizado y por el método Bouyoucos M bajo dos procedimientos de dispersión, en órdenes de suelo de Costa Rica. Valores estimados de arena se compararon con sus valores correspondientes obtenidos por el método de referencia (Pipeta). Línea discontinua representa la relación 1:1. Líneas sólidas en color rojo y azul representan los modelos de mejor ajuste. Paneles verticales negro y blanco representan los dos procedimientos de dispersión.

Figure 9. Comparison between the determination of the soil sand fraction by sieving and by the Bouyoucos M method under two dispersion procedures, across soil orders of Costa Rica. Estimated sand values were compared with the corresponding values obtained with the reference method (pipette). The dashed line represents the 1:1 relationship. Solid red and blue lines represent the best-fit models. Black and white vertical panels correspond to the two dispersion procedures.

Discusión

Efecto del procedimiento de dispersión de la muestra

Los resultados obtenidos en el presente trabajo indican que el agitador horizontal fue superior a la batidora industrial como método de dispersión mecánica de la muestra. Lo anterior podría explicarse por un tiempo prolongado de agitación de las partículas del suelo y una mayor reacción con la solución dispersante (contacto con las partículas), lo que permite la destrucción de potenciales agregados de partículas en tiempo de agitación de doce horas.

Lo anterior concuerda con diversos reportes en la literatura sobre la superioridad del agitador horizontal frente a otros métodos, como la batidora industrial, en la dispersión efectiva de las partículas del suelo (Thorburn y Shaw 1987, Dourado *et al.* 2012, Suzuki *et al.* 2015). Además de una dispersión superior, el agitador horizontal agita varias muestras simultáneamente, lo cual representa una ventaja en los laboratorios donde el PSDA es un análisis de rutina de gran demanda (Dourado *et al.* 2012).

Un inconveniente del uso de la batidora industrial es la potencial de abrasión de partículas, lo cual en principio podría alterar la distribución de partículas del suelo, de acuerdo con lo demostrado por Lemieux (1964) quien a través de micrografías observó este efecto en la fracción arenosa. En ese sentido, Bouyoucos (1951) recomienda que en suelos arenosos no se agite la muestra por más de seis minutos continuos debido al efecto abrasivo, lo que limita el potencial de análisis a suelos con texturas más finas.

Se observó una sobreestimación de la fracción arena cuando se utilizó la batidora industrial como método de dispersión, específicamente en suelos de texturas finas como los Vertisoles, Oxisoles, Ultisoles y Alfisoles, con valores relativos de sobreestimación entre un 100 y 200% (**Figura 4**). Esto se podría explicar por una dispersión incompleta de las partículas, donde los limos y arcillas se mantienen unidos formando agregados de mayor tamaño, los cuales se comportan como partículas de arena. Dicho fenómeno tendría repercusiones no solamente en la asignación de la clase textural, sino en la determinación de valores puntuales como el incremento del contenido de arcilla para la asignación de endopedones argílicos o kándicos (West *et al.* 1997, Buol y Eswaran 1999, Boul *et al.* 2011, Camacho *et al.* 2021), por lo que se recomienda evitar el uso de este procedimiento de dispersión.

Evaluación de las metodologías de análisis de PSDA en suelos de Costa Rica.

Al comparar los resultados obtenidos por las distintas metodologías evaluadas en el presente estudio, se encontró que el método del hidrómetro modificado (Bouyoucos M) obtuvo el desempeño más elevado en la determinación de PSDA, ya que reportó los valores más cercanos a los obtenidos por el método de referencia de la pipeta para los distintos suelos evaluados (**Figuras 3, 4, 5, 6**).

Este buen desempeño se debe a una base teórica sólida sobre los principios de sedimentación de Stokes (Stokes 1851) y las teorías de Fisher-Odén (Fisher y Odén 1925) y confirmación experimental de dichos principios aplicados a la determinación del diámetro efectivo de las partículas y su concentración (Day 1956). Las correcciones al método original del hidrómetro (Bouyoucos 1927) por parte de Casagrande (1934) y Day (1956) en adición a otras observaciones sobre la variabilidad en la densidad de la suspensión con la profundidad efectiva de lectura del hidrómetro (Puri 1932, Codoni 1943) sentaron las bases de un método eficaz y consistente (Gee y Or 2002), cuyos resultados se comparan de buena forma con los obtenidos por el método de referencia de la pipeta (Robinson 2022, Jennings *et al.* 1922, Krauss 1923), de forma similar a los resultados obtenidos en presente trabajo cuando se emplea un procedimiento adecuado de dispersión. Otros estudios reportan un buen desempeño del método del hidrómetro modificado en la determinación de las fracciones de arcilla, arena y limo, en el que se obtienen valores significativamente similares a los determinados por el método de la pipeta (Thorburn y Shaw 1987, Forsythe 1985, Mozaffari *et al.* 2024).

Con respecto a los otros dos métodos evaluados, su desempeño fue inferior al del obtenido por el método modificado del hidrómetro. En ese sentido, el primer método evaluado estima la fracción de arcilla a las 2 horas posteriores a la agitación de la muestra en el cilindro, tiempo en el cual coexisten partículas de limo fino y arcilla, ya que a un tiempo de dos horas el diámetro efectivo estimado por la ecuación de Stokes es de aproximadamente 5 μm , generando una sobreestimación del porcentaje acumulativo de partículas consideradas como arcillas. Este fue un problema que Bouyoucos (1951) consideró en su recalibración del método del hidrómetro, pues el método original se desarrolló bajo la antigua definición de las partículas de arcilla cuyo diámetro efectivo era menor o igual a 5 μm .

El segundo método (Bouyoucos T), en adición a los tiempos de lectura de 40 segundos y dos horas para la estimación respectiva de las fracciones arena y arcilla, presenta problemas metodológicos sistemáticos que no permiten un análisis más profundo del fenómeno de sedimentación, entre ellos: 1) una corrección empírica por cambios en la temperatura que se fundamenta en las sugerencias de Bouyoucos (1962) para valores superiores a 20°C (68° F); 2) el aforo del cilindro de sedimentación con el hidrómetro incluido, lo cual reduce el volumen de la suspensión a 640 ml e incrementa la concentración de partículas, generando datos imprecisos de porcentaje de partículas.

Si bien, este último problema se corrigió en el presente trabajo (ya que las muestras se aforaron a 1 L) la corrección empírica por temperatura se mantuvo en los cálculos de porcentaje acumulativo de partículas. Se observó gran variabilidad en los contenidos de arena obtenidos para el orden de los Oxisoles (**Figura 4**), con una tendencia a la subestimación del contenido total por parte de los métodos bajo el procedimiento de dispersión del agitador horizontal.

Estos comportamientos se podrían explicar por 1) diferencias entre los métodos de análisis de la pipeta y el hidrómetro (Gee y Or (2002), ya que en el primero se determina dicha fracción por tamizado (determinación directa) mientras en el segundo método la determinación se hace por diferencia entre mediciones (determinación indirecta) y 2) la formación de pseudoarenas en Oxisoles, los cuales se forman por la presencia de oxihidróxidos de Fe y Al en estos suelos (Martínez y Souza 2020). Si estos oxihidróxidos no se remueven con pretratamientos como los mencionados por Gee y Or (2002) y Soil Survey Staff (2022), existe la posibilidad que se formen estos microagregados en la muestra, variando los porcentajes reales de arena y arcilla. De hecho, el método estandarizado de la pipeta 3A1a1a (con el cual se determinaron las fracciones) no incluye estos pretratamientos, lo cual refuerza esta hipótesis sobre la variabilidad en los contenidos de arena observada en los Oxisoles de Costa Rica.

Importancia de la corrección por humedad gravimétrica de la muestra

De forma general, el procesamiento de las muestras de suelo incluye una etapa de secado al aire (de diez a quince días), en la cual se asume que el suelo alcanza un estado de estabilidad en el contenido de humedad (Forsythe 1985). Sin embargo, el suelo seco es altamente higroscópico, lo que le permite absorber agua a partir de la humedad relativa del aire, hidratarse e incrementar considerablemente su masa (Hillel 1998).

Este aspecto resulta de suma importancia, ya que el contenido de agua de la muestra podría afectar el cálculo de las fracciones de arcilla, limo y arena en la muestra de suelo. Los resultados obtenidos en el presente estudio evidenciaron el efecto de la humedad presente en la muestra en los resultados de arena y arcilla para los suelos de Costa Rica, los cuales se aproximaron en mayor medida a los determinados por el método de referencia (Pipeta) bajo un adecuado procedimiento de dispersión (**Figuras 7 y 8**).

Al evaluar los valores de humedad gravimétrica de las muestras procesadas en el presente estudio, se observó valores entre 0,02 y 0,17 g g^{-1} , siendo los rangos más frecuentes 0,03, 0,06 0,08 g g^{-1} (**Figura 10**). Estos valores son de importancia ya que un porcentaje de humedad de 0,1 g g^{-1} podría generar errores en el porcentaje acumulativo de partículas de hasta un 10%, lo cual tendría implicaciones tanto en la cuantificación de las fracciones como en la determinación de la clase textural.

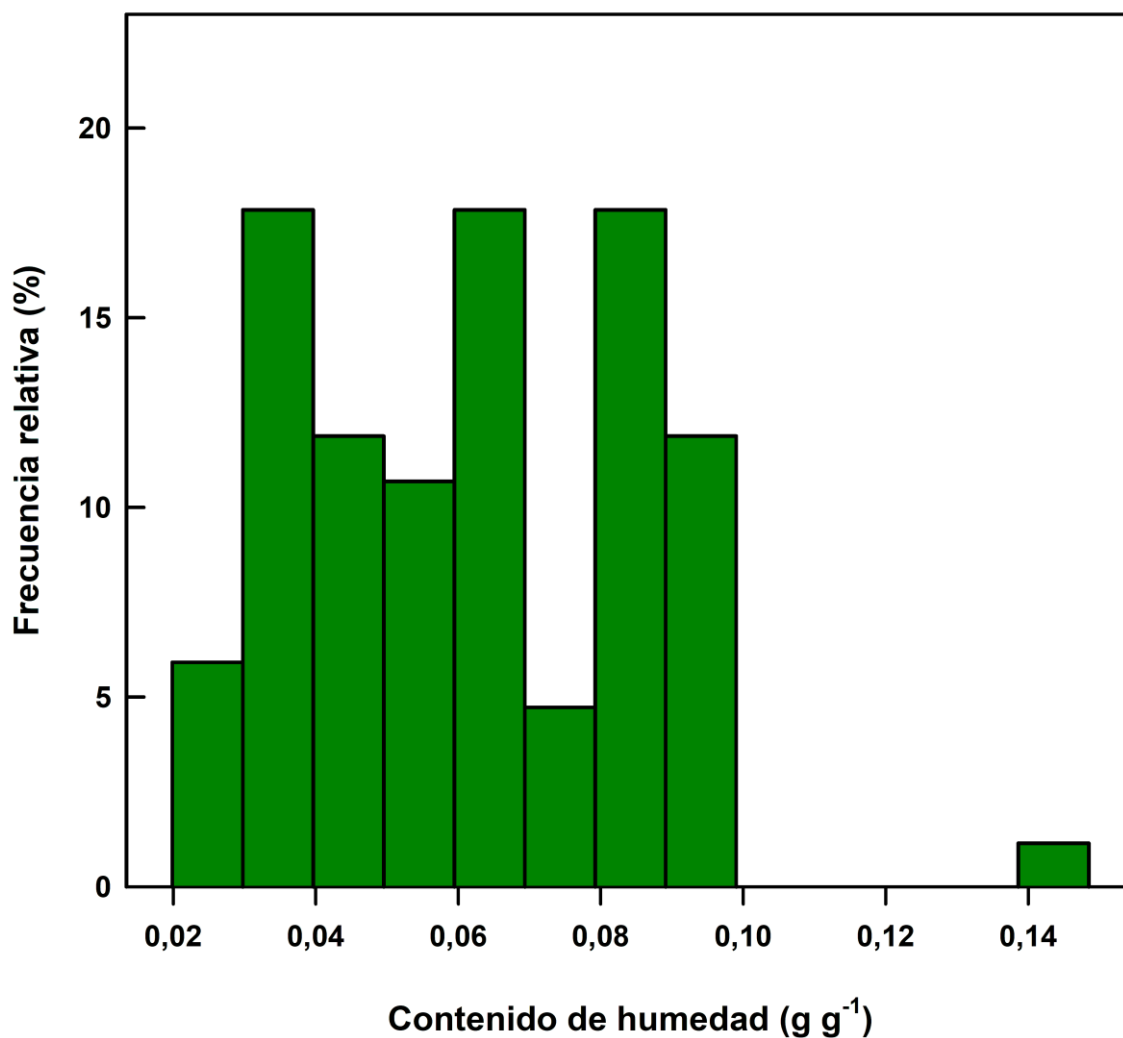


Figura 10. Distribución de la frecuencia del contenido de humedad gravimétrica determinado para las muestras de suelo analizadas en el presente trabajo.

Figure 10. Frequency distribution for the soil gravimetric water content determined for the soil samples analyzed in present research.

Esta corrección se puede hacer de forma paralela al análisis de PSDA, apartando una submuestra de suelo durante la preparación de la muestra para el proceso de dispersión, donde esta submuestra se somete a un secado a 105°C para determinar w siguiendo los lineamientos de Topp y Ferré (2002). Posteriormente, la masa de suelo se corrige mediante la fórmula de cálculo para la masa de sólidos propuesta por Forsythe (1985), y descrita en detalle en la sección de materiales y métodos (**ecuación 12**). Este valor se incluye en los cálculos finales de las fracciones y permite un resultado más preciso.

Fortalezas, debilidades e implicaciones del presente estudio

Debido a sus bases teóricas, un uso extendido y suficiente evidencia científica, el método de la pipeta se considera como la metodología estándar de referencia para la determinación del PSDA en suelos (Gee y Or 2002, Soil Survey Staff 2022). Pese a lo anterior, esta metodología resulta laboriosa y requiere de equipo especializado para su automatización, lo cual limita su uso en laboratorios donde la determinación de la textura del suelo se hace de forma rutinaria y en un volumen elevado de muestras. Por lo anterior, el método del hidrómetro modificado (Bouyoucos M) representa una alternativa factible y consistente para la determinación rutinaria de PSDA en laboratorios de física de suelo, cuyos resultados obtenidos en el presente estudio para suelos de Costa Rica reafirman su confiabilidad y versatilidad de uso, de forma similar a lo reportado en literatura para esta metodología (Thornburn y Shaw 1987, Ulmer *et al.* 1994, Mozaffari *et al.* 2024).

Al analizar los datos obtenidos en el presente estudio, se generaron modelos de regresión para ajustar los valores de arena y arcilla obtenidos mediante métodos densimétricos a su valor correspondiente en un método estandarizado, los cuales se detallan en las **Tablas 2 y 3**. Dichos modelos permitirían corregir los valores obtenidos por estas metodologías a valores obtenidos mediante el método de la pipeta, el cual es el método de referencia en los estudios de taxonomía y clasificación de suelos (Soil Survey Staff 2022), de forma similar a los trabajos realizados por Ulmer *et al.* (1994), Faé *et al.* (2019) o Arriaga *et al.* (2006) donde se proponen modelos de corrección de valores para las distintas metodologías empleadas.

Tabla 2. Modelos de corrección para las fracciones de arcilla y arena estimadas mediante tres metodologías de análisis y un procedimiento de dispersión (batidora industrial) en suelos de Costa Rica. La variable y corresponde al porcentaje corregido de la fracción correspondiente (arcilla o arena) al valor obtenido por el método de referencia (pipeta). La variable x corresponde al porcentaje de la fracción correspondiente (arcilla o arena) obtenida por el método de análisis.

Table 2. Correction models for clay and sand fractions estimated using three analytical methodologies and a dispersion procedure (industrial blender) in soils of Costa Rica. The variable y represents the corrected percentage of the corresponding fraction (clay or sand) relative to the value obtained with the reference method (pipette). The variable x represents the percentage of the corresponding fraction (clay or sand) obtained with the analytical method.

Método de análisis	Modelo de corrección	p-valor	R ²	RMSE	d-Index	NSE
Arcilla						
Bouyoucos	$y = -1,534 + 1,095x$	<0,001	0,94	5,00	0,98	0,94
Bouyoucos T	$y = -4,164 + 1,085x$	<0,001	0,94	5,30	0,98	0,94
Bouyoucos M	$y = 7,099 + 1,049x$	<0,001	0,92	5,90	0,98	0,92
Arena						
Bouyoucos	$y = -12,052 + 1,095x$	<0,001	0,78	8,10	0,93	0,78
Bouyoucos T	$y = -9,702 + 1,096x$	<0,001	0,78	8,02	0,94	0,78
Bouyoucos M	$y = -6,037 + 1,005x$	<0,001	0,84	7,00	0,95	0,84

RMSE: error cuadrático medio; d-Index: el índice de concordancia de Willmott (d); NSE: índice de eficiencia de Nash–Sutcliffe.

Tabla 3. Modelos de corrección para las fracciones de arcilla y arena estimadas mediante tres metodologías de análisis y un procedimiento de dispersión (agitador horizontal) en suelos de Costa Rica. La variable y corresponde al porcentaje corregido de la fracción correspondiente (arcilla o arena) al valor obtenido por el método de referencia (pipeta). La variable x corresponde al porcentaje de la fracción correspondiente (arcilla o arena) obtenida por el método de análisis.

Table 3. Correction models for clay and sand fractions estimated using three analytical methodologies and a dispersion procedure (horizontal shaker) in soils of Costa Rica. The variable y represents the corrected percentage of the corresponding fraction (clay or sand) relative to the value obtained with the reference method (pipette). The variable x represents the percentage of the corresponding fraction (clay or sand) obtained with the analytical method.

Método de análisis	Modelo de corrección	p-valor	R ²	RMSE	d-Index	NSE
Arcilla						
Bouyoucos	$y = -5,899 + 1,013x$	<0,001	0,90	6,73	0,97	0,90
Bouyoucos T	$y = -8,007 + 0,996x$	<0,001	0,89	7,11	0,97	0,89
Bouyoucos M	$y = 1,231 + 1,021x$	<0,001	0,92	5,94	0,98	0,92
Arena						
Bouyoucos	$y = -0,459 + 0,974x$	<0,001	0,73	9,01	0,91	0,73
Bouyoucos T	$y = 1,907 + 0,967x$	<0,001	0,73	9,06	0,91	0,72
Bouyoucos M	$y = 5,083 + 0,903x$	<0,001	0,78	8,16	0,93	0,78

RMSE: error cuadrático medio; d-Index: el índice de concordancia de Willmott (d); NSE: índice de eficiencia de Nash–Sutcliffe.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo demostraron que la determinación directa de la fracción de arena por tamizaje (cribas) no incrementó la concordancia entre los resultados obtenidos por el método del hidrómetro modificado y sus correspondientes valores obtenidos con el método de referencia (Soil Survey Staff 2022). Esto anterior implica que el método del hidrómetro modificado no se beneficiaría de incluir un paso adicional en el que se separe la fracción arenosa mediante los tamices para mejorar la precisión en la determinación de la fracción arena.

Un potencial limitante del presente estudio fue la ausencia de muestras de suelo con texturas arcillo arenosas, franco arcillo arenosas, franco arcillo limosas, limosas (> 80% de limo), arenas francas y arenosas (>85% de arena), las cuales pudieron completar las doce clases texturales en suelos de Costa Rica, y potenciar el alcance de los resultados obtenidos. Las futuras investigaciones sobre estas metodologías de análisis deberán incluir dichas clases texturales.

Por otro lado, nuevas tecnologías se han desarrollado para la determinación de PSDA, como el uso de sensores de turbidez o sensores laser para la determinación de la concentración de la suspensión de sólidos del suelo (Arriaga *et al.* 2006, Weiwen y Wei 2021, Zang *et al.* 2024), las cuales no han sido debidamente evaluadas y validadas en suelos de Costa Rica. Estas limitaciones en el presente estudio, en adición a estas metodologías alternativas recientes representa una oportunidad de investigaciones futuras, donde de forma paralela, se analicen las muestras mediante el método estandarizado, el que consideramos eficaz para el análisis bajo nuestras condiciones y estas nuevas tecnologías, donde se contrasten la fiabilidad de sus resultados, ventajas y limitaciones.

También se deberá considerar los pretratamientos para eliminar agentes cementantes, y evaluar su pertinencia en suelos específicos, entre ellos los Vertisoles (carbonatos), Ultisoles y Oxisoles (óxidos de Fe y Al), y los Andisoles (materia orgánica) en futuras investigaciones, así como los potenciales costos asociados y pertinencia en el análisis de PSDA en laboratorios de Costa Rica.

Conclusiones

En el presente trabajo, se encontró un efecto del procedimiento de dispersión sobre los valores de arcilla, limo y arena obtenidos en los distintos métodos de análisis. Pese a que, en el procedimiento de la batidora industrial las muestras se dejaron embebidas durante toda la noche en el agente dispersante (paso que algunas metodologías omiten), este procedimiento no mejoró la dispersión de las partículas. En contraste, el agitador horizontal favoreció la dispersión de las muestras, permitiendo resultados más cercanos a los obtenidos por el método de referencia.

Respecto a las metodologías de análisis evaluadas, el método que generó resultados con mayor aproximación a los valores obtenidos mediante la pipeta fue el Bouyoucos modificado. En ese sentido, conviene realizar lecturas con el hidrómetro entre las 6 y 24 horas posteriores a la mezcla de la muestra, para una determinación más precisa de la fracción fina (arcillas).

Un aspecto importante para la obtención de resultados precisos es la corrección por el contenido de humedad de muestra en los cálculos correspondientes, ya que demostró tener un efecto significativo en el valor final estimado.

Por otra parte, la determinación directa de la fracción arena mediante tamizado se implementó con el fin de contrastar su desempeño frente al método de Bouyoucos modificado. Sin embargo, los resultados obtenidos indican que el procedimiento y esfuerzo adicional implicado no se traduce en una mejora sustancial en la estimación de esta fracción. Por lo tanto, no sería recomendable su implementación rutinaria en el análisis de laboratorio.

La implementación de métodos más eficientes permite una mayor agilidad en el procesamiento de las muestras. Aunque en el procedimiento de Bouyoucos modificado requiere de mayor cantidad de tiempos de lectura, es posible sistematizar la rutina para el análisis de una cantidad de muestras considerable.

Si bien el método de referencia es el más preciso en la determinación del PSDA, en el presente trabajo se comprobó que la complejidad y limitaciones dicho método reduce considerablemente la cantidad de muestras por analizar, lo que reduce su aplicabilidad como método rutinario en el laboratorio.

Literatura citada

Aini, FK; Hergoualc'h, K; Smith, JU; Verchot, L; Martius, C. 2020. How does replacing natural forests with rubber and oil palm plantations affect soil respiration and methane fluxes? *Ecosphere* 11(11):e03284. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecs2.3284>

Ares, A; Molina, E; Cox, F; Yost, R; Boniche, J. 2002. Fertilización fosforada del pejibaye para palmito (*Bactris gasipaes*) en vivero y en plantación. *Agronomía Costarricense* 26(2):63-74.

Arriaga, FJ; Lowery, B; Mays, MD. 2006. A fast method for determining soil particle size distribution using a laser instrument. *Soil Science* 171(9):663-674.

Bouyoucos, GJ. 1927. The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soils. *Soil Science* 23(5):343-354. DOI: <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-192705000-00002>

Bouyoucos, GJ. 1930. A New Method of Measuring the Comparative Rate of Percolation of Water in Different Soils 1. *Agronomy Journal* 22(5):438-445. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj1930.00021962002200050007x>

Bouyoucos, GJ. 1951. A Recalibration of the Hydrometer Method for Making Mechanical Analysis of Soils 1. *Agronomy Journal* 43(9):434-438. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj1951.00021962004300090005x>

Bouyoucos, GJ. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis. *Agronomy Journal* 54(5):464-465. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>

Buol, SW; Eswaran, H. 1999. Oxisols. *Advances in agronomy* 68:151-195. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60845-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60845-7)

Buol, SW; Southard, RJ; Graham, RC; McDaniel, PA. 2011. *Soil genesis and classification*. Sixth ed. John Wiley & Sons, Chichester, UK. p. 543.

Camacho, ME; Mata, R; Barrantes-Viquez, M; Alvarado, A. 2021. Morphology and characteristics of eight Oxisols in contrasting landscapes of Costa Rica. *Catena* 197:104992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104992>

Casagrande, A. 1934. *Die Aräometer-Methode Zur Bestimmung Der Kornverteilung Von Böden Und Anderen Materialien*. Springer, 56 p.

Codoni, MR. 1943. Density of soil suspensions and the use of densimeters for mechanical analysis. *Soil Science* 56(1):7-18.

Day, PR. 1956. Report of the committee on physical analyses, 1954-55, Soil Science Society of America. *Soil Science Society of America Journal* 20(2):167-169. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1956.03615995002000020007x>

Day, PR. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. *In* Black, CA. (ed.). *Methods of Soil Analysis*. Part I. Agronomy No. 9. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA. p. 545-566.

Dourado, TA; Silva, LFSD; Marinho, MDA. 2012. Performance of a reciprocal shaker in mechanical dispersion of soil samples for particle-size analysis. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 36:1131-1148. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000400008>

Durango, W; Uribe, L; Henríquez, C; Mata, R. 2015. Respiración, biomasa microbiana y actividad fosfatasa del suelo en dos agroecosistemas y un bosque en Turrialba, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 39(1):37-46.

Faé, GS; Montes, F; Bazilevskaya, E; Añó, RM., Kemanian, AR. 2019. Making soil particle size analysis by laser diffraction compatible with standard soil texture determination methods. *Soil Science Society of America Journal* 83(4):1244-1252. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.10.0385>

Fisher, RA; Odén, S. 1925. XI. The Theory of the Mechanical Analysis of Sediments by means of the Automatic Balance. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh 44:98-115. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0370164600020836>

Forsythe, WM. 1985. Manual de Laboratorio Física de Suelos. San José, Costa Rica, Editorial del IICA.

Gee, GW; Or, D. 2002. 2.4 Particle-size analysis. In Dane, JH; and Topp, GC. (ed.). Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods. SSSA Book Series. Soil Science Society of America. Madison, WI. p. 255-293. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c12>

Henríquez, C; Cabalceta, G. 1999. Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola. Costa Rica, ACCS. p.111.

Hergoualc'h, K; Skiba, U; Harmand, JM; Oliver, R. 2007. Processes responsible for the nitrous oxide emission from a Costa Rican Andosol under a coffee agroforestry plantation. Biology and Fertility of Soils 43(6):787-795. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-007-0168-z>

Hillel, D. 1998. Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations. Academic Press, Waltham.

Jennings, D; Thomas, M; Gardner, W. 1922. A new method of mechanical analysis of soils. Soil Science 14:485.

Jury, WA; Horton, R. 2004. Soil physics. New Jersey. USA, John Wiley & Sons.

Krauss, G. 1923. Über eine neue Methode der mechanischen Bodenanalyse. Int. Mitt.Bodenk.13:147-160.

Lemieux, GJ. 1964. Efficiency of various shakers in the particle-size analysis of soils. Canadian Journal of Soil Science 44(2):228-231. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjss64-032>

Martínez, P; Souza, IF. 2020. Genesis of pseudo-sand structure in Oxisols from Brazil—A review. *Geoderma Regional* 22: e00292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00292>

Mollinedo, M; Ugalde, L; Alvarado, A; Verjans, JM; Rudy, LC. 2005. Relación suelo-árbol y factores de sitio, en plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis*), en la zona oeste de la cuenca del canal de Panamá. *Agronomía Costarricense* 29(1):67-75.

Mozaffari, H; Moosavi, AA; Baghernejad, M; Cornelis, W. 2024. Revisiting soil texture analysis: Introducing a rapid single-reading hydrometer approach. *Measurement* 228:114330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114330>

NCSS (National Cooperative Soil Survey). 2024. Soil Survey Characterization Database. Disponible en <http://ncsslabsdatamart.sc.egov.usda.gov/>

Puri, AN. 1932. A new type of hydrometer for the mechanical analysis of soils. *Soil Science* 33(4):241-248.

R Studio Team. 2015. R Studio: Integrated Development for R. Boston: R Studio, Inc. Disponible en <http://www.rstudio.com>

Radcliffe, DE; Šimunek, J. 2018. Soil physics with HYDRUS: Modeling and applications. CRC press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315275666>

Ramírez, L; Alvarado, A; Mesalles, RP; McHugh, A; Brenes, LG. 2008. Indicadores para estimar la sostenibilidad agrícola de la cuenca media del río Reventado, Cartago, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 32(2):93-118.

Robinson, GW. 1922. A new method for the mechanical analysis of soils and other dispersions. *The Journal of Agricultural Science* 12(3):306-321.

Schoeneberger, PJ; Wysocki, DA; Benham, EC; Soil Survey Staff. 2012. Field book for describing and sampling soils (Version 3.0). USDA–NRCS, National Soil Survey Center.

Siles, P; Harmand, JM; Vaast, P. 2010. Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. *Agroforestry systems* 78(3):269-286. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9241-y>

Soil Survey Staff. 2014. Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual (Investigations Report No. 51, Version 2.0). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.

Soil Survey Staff. 2022. Kellogg Soil Survey Laboratory methods manual (Investigations Report No. 42, Version 6.0). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.

Steduto, P; Hsiao, TC; Raes, D; Fereres, E. 2009. AquaCrop The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal* 101(3):426-437. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>

Stokes, GG. 1851. On the effect of internal friction of fluids on the motion of pendulums. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* 9(2):8-106.

Suzuki, LEAS; Reichert, JM; Albuquerque, JA; Reinert, DJ; Kaiser, DR. 2015. Dispersion and flocculation of Vertisols, Alfisols and Oxisols in southern Brazil. *Geoderma Regional* 5:64-70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.03.005>

Thorburn, PJ; Shaw, RJ. 1987. Effects of different dispersion and fine-fraction determination methods on the results of routine particle-size analysis. *Australian Journal of Soil Research* 25(4):347-360. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR9870347>

Topp, GC; Ferré, PA. 2002. Water Content. *In* Dane, JH; Topp, GC (ed.). *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*. SSSA Book Series. Soil Science Society of America. Madison, WI. p. 417-546. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c19>

Ulmer, MG; Knuteson, JA; Patterson, DD. 1994. Particle Size Analysis by Hydrometer: A Routine Method for Determining Clay Fraction. *Soil Survey Horizons* 35(1):11-17. DOI: <https://doi.org/10.2136/sh1994.1.0011>

van Genuchten, MTh, Leij, FJ; Yates, SR. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. EPA 600/2-91/065. USEPA, Ada, OK.

Weiwen, QIU; Wei, HU. 2021. Soil particle size range correction for improved calibration relationship between the laser-diffraction method and sieve-pipette method. Pedosphere 31(1):134-144. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(20\)60055-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60055-8)

West, LT; Beinroth, FH; Sumner, ME; Kang, BT. 1997. Ultisols: Characteristics and impacts on society. Advances in Agronomy 63:179-236. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60244-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60244-8)

Zhang, X; Warren, CJ; Spiers, G; Voroney, P. 2024. Comparison of the integral suspension pressure (ISP) and the hydrometer methods for soil particle size analysis. Geoderma 442:116792. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116792>

