

## Evaluación de los componentes químicos del suelo en el sistema productivo de arracacha en Cajamarca, Colombia

José Luis Contreras-Santos<sup>1</sup>  
Jorge Enrique Villamil-Carvajal<sup>2</sup>  
Johanna Paola Garnica-Montaña<sup>2§</sup>  
Liliana Margarita Atencio-Solano<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de investigación Turipana-Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Agrosavia. Vía Montería Cereté km 13, Montería, Colombia. CP. 230009. (jlcontreras@agrosavia.co; latencio@agrosavia.co). <sup>2</sup>Centro de investigación Nataima-Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia. Vía Espinal Ibagué, Espinal Tolima km 9, Colombia. CP. 733529. (jvillamil@agrosavia.co).

§Autora para correspondencia: jgarnicam@agrosavia.co.

### Resumen

El cultivo de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.) hace parte de la cultura culinaria y economía andina de Colombia, su importancia radica en ser una fuente primordial en la dieta y nutrición campesina. La baja tecnificación del cultivo, asociado a prácticas inadecuadas de manejo de suelo, ha generado estancamiento en los rendimientos regionales, lo que ha generado aumento en la brecha de conocimiento tecnológico entre los productores. Por tal razón, el objetivo del presente estudio fue evaluar las propiedades químicas del suelo, bajo el sistema de producción de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.) e identificar las principales limitantes químicas del suelo, que afectan el rendimiento en el cultivo, en el municipio de Cajamarca, Tolima. Se tomaron muestras de suelos durante la época de transición seco-lluviosa en 50 predios distribuidos en 17 veredas del municipio, sobre las que se evaluaron los parámetros químicos de suelos, así mismo, se estimó la producción de raíces tuberosas con base en la densidad de siembra promedio de la región de 16 666 plantas ha<sup>-1</sup>. Se observó que 81% de los predios evaluados presentaron reacción acida (5.25 ±0.15 a 6.6 ±1.1), contenido de materia orgánica (MO) en rango medio (>3%) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) con valores bajos (3.31 ±0.64 a 15.35 ±10.25 cmol kg<sup>-1</sup>). El rendimiento de raíces tuberosas en fresco estuvo condicionado a la presencia de los contenidos de MO, calcio (Ca) y potasio (K) intercambiable en el suelo. Los resultados obtenidos evidenciaron procesos de degradación química del suelo asociados a la fertilización implementada por los productores en la región.

**Palabras clave:** Apiacea, materia orgánica, pH, producción agrícola, suelo.

Recibido: agosto de 2022

Aceptado: octubre de 2022

## Introducción

La arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.) es una planta herbácea rústica, típica de la zona andina, adaptada a diferentes áreas agroecológicas con altitud entre 1 500 y 3 000 m. La arracacha es de gran importancia agroalimentaria (Morillo *et al.*, 2020), es fuente de fibra y minerales como hierro, fósforo, calcio y magnesio, que se comercializa generalmente en fresco y se destaca además por su potencial agroindustrial (Garnica *et al.*, 2021). El sistema productivo lo desarrollan pequeños productores, quienes transmiten sus conocimientos entre miembros de las comunidades por tradición oral (Muñoz *et al.*, 2015).

En Colombia se siembran 9 277 ha de arracacha en 14 departamentos, con un rendimiento medio de 8.55 t ha<sup>-1</sup> y una producción total de 101 604 t, de la cual el Tolima aporta 62.2%. Este departamento estableció 5 504 ha con una producción de 63 233 t y rendimiento medio de 9.98 t ha<sup>-1</sup> (MinTIC, 2019) destacándose el municipio de Cajamarca, con rendimiento medio de 12 t ha<sup>-1</sup> y 4 521 ha sembradas en 483 predios, distribuidas en 33 veredas de las 42 que tiene (Garnica *et al.*, 2021).

En Colombia las investigaciones realizadas en el cultivo de arracacha principalmente sobre el componente de nutrición y características químicas de los suelos son escasas. Más 90% de los productores fertiliza sin conocer las propiedades químicas de sus suelos y lo hacen de manera empírica con dosis y fuentes de nutrientes inadecuadas, enfocadas principalmente en nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) (Muñoz *et al.*, 2015). Esta implementación inadecuada de la fertilización química del suelo en busca de mejorar los indicadores de desarrollo productivos del cultivo ha conllevado al incremento en los costos de producción, lo que genera una reducción en los ingresos del productor, además de contribuir a la degradación de los suelos.

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente estudio buscó evaluar las propiedades químicas del suelo, bajo el sistema de producción de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.) e identificar las principales limitantes químicas de suelo, que afectan el rendimiento en el cultivo en el municipio de Cajamarca, Tolima.

## Materiales y métodos

### Localización

El estudio se realizó en la principal zona productora de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.), ubicada en el municipio de Cajamarca, Tolima, en Colombia, que se caracteriza por un relieve predominante de montaña y alta montaña, pendientes largas superiores al 50%. Las condiciones ambientales predominantes son: precipitación de 2 500 a 2 800 mm año<sup>-1</sup>, temperatura media anual de 12 a 18 °C y humedad relativa 83%. De acuerdo a las zonas agroecológicas identificadas, el estudio se llevó a cabo en un bosque húmedo premontano (Bh-PM) para las veredas ubicadas entre los 1 000 a 2 000 msnm y un bosque muy húmedo premontano (bmh-PM) para las ubicadas entre los 2 000 a 4 000 msnm (Cuadro 1) (Holdridge, 1982).

**Cuadro 1. Veredas seleccionadas en el estudio en el municipio de Cajamarca, Tolima 2016.**

Veredas	Rango altitudinal (m)	Área (ha)	Producción (t ha <sup>-1</sup> )
El Águila	2 151 a 2 603	468	18.56
Potosí	2 253 a 2 534	432	21.34
Las Lajas	2 255 a 2 649	377	13
La Leona	2 340 a 2 485	356	20.31
Plata Montebello	2 427 a 2 556	241	33.37
La Tigrera	2 097 a 2 633	190	23.88
La Judea	2 163 a 2 559	171	14.83
Cedral	2 325 a 2 345	162	15
Las Hormas	2 022 a 2 196	129	17.08
La Bolívar	2 644 a 2 834	115	15.43
La Paloma	2 266 a 2 680	109	16.31
La Despunta	2 131 a 2 218	90	15
Rincón Placer	2 350 a 2 367	80	7.81
Pan de Azúcar	2 367 a 2 370	62	18.37
Altamira	2 352 a 2 576	54	15.83
Puente Hierro	1 958 a 2 006	34	23.37
La Alsacia	1 850 a 1 872	25	14,41

UMATA (2018).

Los suelos característicos del área de estudio corresponden al orden Andisol, con distribución de horizontes: A-AB-Bw-C, predominio de textura franco-arenosa, estructura granular, medianamente desarrollada y buen drenaje natural. El paisaje delinea estrechos valles, desarrollados sobre rocas ígneas como metamórficas, cubiertas de ceniza volcánica de diferente espesor, de donde derivan los suelos más abundantes de la zona: Hapludands y Melanudands. Los suelos del municipio de Cajamarca presentan una fertilidad media a alta (IGAC, 2004; Chaali *et al.*, 2020).

### Marco muestral

Se seleccionaron 17 veredas en Cajamarca de acuerdo con área de siembra y producción de arracacha (Cuadro 1) según la Unidad Municipal de Asistencia Técnica Agropecuaria en el año 2018 (UMATA, 2018). El cálculo del tamaño de la muestra se realizó aplicando la ecuación 1 descrita por Aguilar (2005).  $n = \frac{Z^2 N p q}{p q Z^2 + (N-1) e^2} + 1$ . Donde: n: tamaño de la muestra; N= tamaño de la población; Z= coeficiente para un nivel de confianza del 95%; p= proporción de individuos que poseen la característica de interés, se asumió en 0.5; q= proporción de individuos que no poseen la característica de interés, se asumió en 0.5; e= error máximo admisible, se asumió en 6.36%. Debido a que no se conoce la varianza de la población en estudio, se asumió la mayor varianza posible; es decir, considerando los valores de p= q= 0.5.

La aplicación de la ecuación permitió determinar un tamaño de muestra de 50 predios para el diagnóstico de suelos, lo cual, correspondió al 10.4% de la población total de los predios registrados para la producción de arracacha que es 483 predios. La base de datos sobre los parámetros químicos de suelo se alimentó con información secundaria suministrada por el laboratorio de suelos y aguas de AGROSAVIA de los últimos 10 años.

Con el fin de generar confiabilidad en la información, se realizó la depuración de los datos a partir de tres criterios: cultivo de arracacha, época de transición seca a lluviosa y profundidad muestral de 0-30 cm. Obteniendo 51 predios que cumplieron con los datos mínimos requeridos para el análisis de la información (información secundaria). En general se trabajó con 101 análisis de fertilidad química de suelos, distribuidos en las 17 veredas (Cuadro 1).

### **Muestreo y propiedades químicas del suelo**

El muestreo se realizó en el año 2019 en el periodo de transición seco-lluvioso (febrero-marzo) en cada una de las veredas seleccionadas (Cuadro 1). Se tomaron muestras por triplicado de suelo de 0 a 30 cm de profundidad, en puntos aleatorios dentro del predio. Las muestras de suelo de cada predio fueron mezcladas y homogenizadas, para la obtención de una muestra compuesta representativa de aproximadamente un kilogramo de peso la cual, se empacó e identificó con el nombre del predio, propietario, vereda, corregimiento, municipio y posteriormente enviada al laboratorio de suelos y aguas de AGROSAVIA, donde se realizó un análisis químico completo.

Los parámetros químicos del suelo se analizaron mediante los siguientes métodos: La reacción del suelo o pH, se determinó mediante el método potenciométrico, con relación 1:1 P/V (Hendershot *et al.*, 2007), método de materia orgánica-MO (%) oxidación Walkley-Black (Nelson y Sommers, 2018); fósforo-P ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) extracción Bray II modificado y cuantificación por reducción con ácido ascórbico (Bray y Kurtz, 1945); azufre-S ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) extracción con monofosfato de calcio 0.008 M y cuantificación turbidimétrica; potasio-K, calcio-Ca, magnesio-Mg y sodio-Na ( $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$ ) por medio de espectrofotometría de absorción y emisión atómica (Hendershot *et al.*, 2007; Chapman 2016), Norma Técnica Colombiana-NTC 5349 (ICONTEC, 2016); hierro-Fe, manganeso-Mn, zinc Zn y cobre-Cu ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) se determinaron por medio del método de Olsen modificado espectrofotometría y cuantificación por absorción atómica, NTC 5526:2007 (ICONTEC, 2007) y boro-B ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) por extracción con fosfato monobásico de calcio-azometina H, NTC 5404:2011 (ICONTEC, 2011).

### **Rendimiento del cultivo de arracacha ( $\text{t ha}^{-1}$ )**

El rendimiento se obtuvo a partir de información por los agricultores de los predios, para la cual se consideró una densidad promedio de 16 666 plantas  $\text{ha}^{-1}$  con un margen de pérdida de 7% por raíces no comerciales y pigmentación morada (Atencio *et al.*, 2021).

### **Análisis estadístico**

Se realizó un análisis estadístico descriptivo, mediante análisis de frecuencia y concentraciones de nutrientes (Castro y Gómez, 2010). Posteriormente, la información de parámetros químicos de suelo fue procesada usando métodos estáticos descritos por Gómez y Gómez (1984). La normalidad se realizó con el estadístico de Shapiro-Wilk ( $p > 0.05$ ), para este estudio no se requirió la

transformación de los datos. La selección del conjunto mínimo de datos se realizó con un análisis de componentes principales (ACP); a través, del procedimiento Pro-factor. Las correlaciones lineales se verificaron mediante el análisis de correlación de Pearson (PROC CORR), el software utilizado para en el análisis de la información es el Statistical Analysis System-SAS v.9.3.

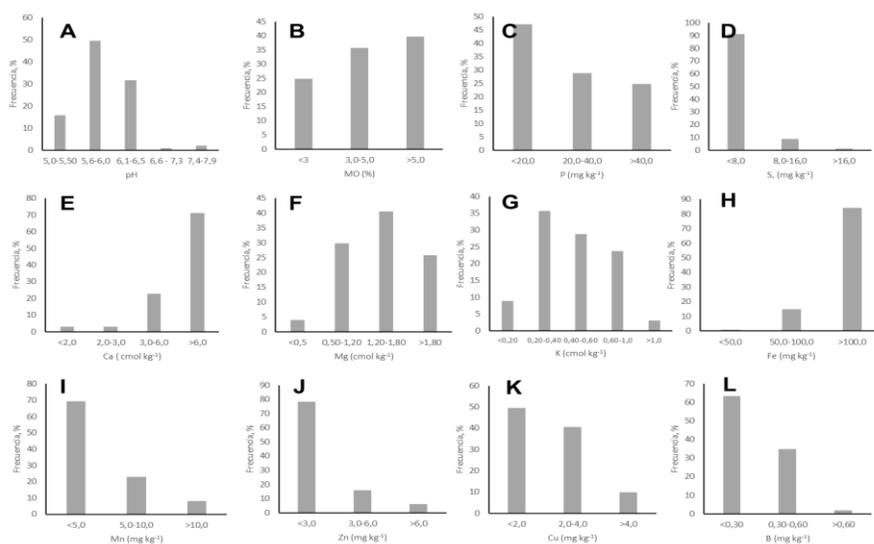
### Resultados y discusión

El pH mostró un promedio general de  $5.94 \pm 0.4$  con rango de variación de  $5.25 \pm 0.15$  a  $6.22 \pm 0.15$  (Cuadro 2), valores que indican que el suelo varió desde una condición fuertemente ácida (La Bolívar) a ligeramente ácida (Plata Montebello) (Castro y Gómez, 2010). El análisis de frecuencia mostró que 81% de los predios, presentaron un rango de variación de pH 5.6 a 6.5 (modernamente a ligeramente ácida), 16% valores inferiores a 5.5 (fuertemente ácida) y 3% restante valores mayores a 6.6 (neutral) (Figura 1A).

**Cuadro 2. Contenidos de macronutrientes del suelo en la zona de estudio.**

Vereda	S	P	Ca	Mg	K	Na
El Águila	4.36 ±1.98 B	34.97 ±20.25 M	7.54 ±3.97 A	1.69 ±0.75 M	0.59 ±0.19 M	0.13 ±0.06 M
Potosí	5.27 ±1.58 B	21.28 ±10.29 M	7.78 ±1.65 A	1.36 ±0.81 M	0.48 ±0.23 M	0.05 ±0.01 B
Las Lajas	4.67 ±0.68 B	37.29 ±14.69 M	7.55 ±1.84 A	1.69 ±0.47 M	0.55 ±0.18 M	0.06 ±0 B
La Leona	7.97 ±5.48 B	111.21 ±90.7 A	7.45 ±1.74 A	1.62 ±0.42 M	0.87 ±0.58 A	0.08 ±0.05 B
Plata Monte.	2.97 ±1.35 B	15.85 ±9.28 B	7.38 ±1.48 A	1.56 ±0.31 M	0.58 ±0.19 M	0.13 ±0.02 M
La Tigresa	3.83 ±0.73 B	34.74 ±18.88 M	6.97±0.83 A	1.04 ±0.45 B	0.35 ±0.13 B	0.05 ±0.02 B
La Judea	2.58 ±0.45 B	99.11 ±100.33 A	6.51 ±1.76 A	1.08 ±0.41 B	0.43 ±0.19 M	0.08 ±0 B
Cedral	3.45 ±0.67 B	18.57 ±8.78 B	6.9 ±0.67 A	2.47 ±0.52 A	0.25 ±0.12 B	0.1 ±0.4 B
Las Hormas	8.66 ±4.46 M	11.16 ±3.49 B	4.87 ±2.85 M	1.21 ±0.46 M	0.69 ±0.63 A	0.11 ±0.04 M
La Bolívar	6.23 ±1.15 B	16.49 ±2.9 B	1.79 ±0.44 B	0.45 ±0.16 B	0.22 ±0.08 B	0.06 ±0.01 B
La Paloma	5.79 ±3.84 B	22.42 ±5.43 M	4.87 ±2.43 M	0.97 ±0.51 B	0.28 ±0.08 B	0.07 ±0.02 B
La Despunta	5.06 ±0.74 B	56.56 ±34.79 A	9.3 ±1.98 A	1.35 ±0.23 M	0.82 ±0.47 A	0.12 ±0.03 M
Rincón Placer	5.96 ±2.93 B	94 ±132.24 A	6.72 ±1.63 A	1.91 ±0.82 M	0.25 ±0.04 B	0.11 ±0.06 M
Pan Azúcar	6.16 ±2.04 B	33.38 ±34.20 M	12.96 ±.39 A	1.86 ±0.99 A	0.31 ±0.08 B	0.12 ±0.03 M
Altamira	4.77 ±1.06 B	33.06 ±15.98 M	3.88 ±1.19 M	0.97 ±0.22 B	0.32 ±0.02 B	0.07 ±0.02 B
Puente Hierro	2.97 ±0.73 B	30.19 ±2.9 M	4.94 ±0.89 M	0.84±0.45 B	0.26 ±0.09 B	0.07 ±0.01 B
La Alsacia	2.6 ±0.1 B	12.95 ±4.15 B	6.24 ±0.27 A	1.48 ±0.36 M	0.33 ±0.09 B	0.09 ±0.03 B
R <sup>2</sup>	0.57	0.45	0.45	0.56	0.48	0.65
CV	44.66	113.73	44.85	36.62	60.38	34.77
Media	5.06 ±2.76	39.43 ±48.7	7.2 ±3.49	1.4 ±0.62	0.51 ±0.34	0.09 ±0.04

S, P= mg kg<sup>-1</sup>; Ca, Mg, K y Na= cmol kg<sup>-1</sup>; A= alto; M: medio; B= bajo; R<sup>2</sup>= coeficiente de determinación; CV= coeficiente de variación (%); ±= desviación estándar.



**Figura 1. Distribución de frecuencia de las propiedades químicas del suelo.**

Se observó correlación significativa ( $p < 0.05$ ) entre el rendimiento del cultivo y el pH del suelo, indicando que a medida que este aumenta, se mejora de forma sustancial la producción de las raíces tuberosas. Se ha reportado que suelos fértiles, bien drenados y con pH de 5.6 a 6 son óptimos para el desarrollo del cultivo de arracacha (Amaya y Julca, 2006; Alvarado y Ochoa, 2010) lo que concuerda con los valores de pH registrados en el área de estudio. El 75% de los predios presentaron valores de MO  $>3\%$ , de acuerdo con las condiciones ambientales regionales se encuentra con contenido medio de MO (Castro y Gómez, 2010), de este porcentaje 39.6% de los predios presentaron MO superior al 5% lo que corresponde a contenidos altos (Figura 1B).

El contenido de MO mostró valor promedio de  $5.15 \pm 2.74\%$ , con rango de variación entre  $3.27 \pm 1.56$  (medio) y  $8.88 \pm 5.47\%$  (alto), siendo la vereda Las Hormas donde se evidencio el mayor contenido de MO en el suelo, seguido de Potosí ( $7.25 \pm 2.55\%$ ), Las Lajas ( $7.19 \pm 1.59\%$ ) y La Bolívar ( $7.12 \pm 2.52\%$ ). Se ha reportado que altos contenidos de MO en el suelo bajo el sistema de producción de arracacha están relacionados con altos rendimientos de la raíz tuberosa por hectárea (Alvarado y Ochoa, 2010), asimismo, otros autores reportan que altos valores de MO en el suelo favorecen la actividad de microorganismos, favoreciendo la disponibilidad de nutrientes (Nunes *et al.*, 2016; Heid *et al.*, 2019). Estos resultados son similares a los reportados en esta investigación, encontrando una correlación positiva ( $r = 0.55$ ) entre el contenido de MO y el rendimiento de las raíces por hectárea (Cuadro 3).

**Cuadro 3. Propiedades químicas de los suelos en la zona de estudio.**

Vereda	pH	MO	CE	CIC
El Águila	$6.14 \pm 0.36$ LA	$3.38 \pm 1.36$ M	$0.24 \pm 0.13$ MB	$9.72 \pm 04.37$ B
Potosí	$5.98 \pm 0.24$ MA	$7.25 \pm 2.55$ A	$0.24 \pm 0.16$ MB	$9.69 \pm 2.45$ B
Las Lajas	$5.97 \pm 0.43$ MA	$7.19 \pm 1.59$ A	$0.15 \pm 0.05$ MB	$9.86 \pm 2.43$ B
La Leona	$6.04 \pm 0.19$ LA	$4.9 \pm 1.6$ M	$0.41 \pm 0.21$ MB	$10.01 \pm 1.85$ B
Plata Monte	$6.22 \pm 0.15$ LA	$3.39 \pm 1.05$ M	$0.19 \pm 0.07$ MB	$9.66 \pm 1.82$ B

Vereda	pH	MO	CE	CIC
La Tigrera	5.85 ±0.11 MA	6.56 ±2.72 A	0.09 ±0.05 MB	8.42 ±1.04 B
La Judea	5.57 ±0.02 MA	3.69 ±0.68 M	0.13 ±0.03 MB	8.1 ±2.11 B
Cedral	5.82 ±0.48 MA	3.27 ±1.56 M	0.18 ±0.04 MB	9.72 ±0.03 B
Las Hormas	5.72 ±0.48 MA	8.88 ±5.47 A	0.44 ±0.33 MB	6.86 ±3.7 B
La Bolívar	5.25 ±0.15 FA	7.12 ±2.52 A	0.21 ±0.04 MB	3.31 ±0.64 B
La Paloma	5.59 ±0.25 MA	5.41 ±0.72 A	0.23 ±0.13 MB	6.29 ±2.86 B
La Despunta	6.04 ±0.13 LA	4.74 ±0.52 M	0.45 ±0.26 MB	11.58 ±2.21 M
Rincón Placer	5.98 ±0.63 MA	4.4 ±2.41 M	0.28 ±0.19 MB	9 ±2 B
Pan Azúcar	6.6 ±1.1 LA	4.24 ±3 M	0.32 ±0.11 MB	15.35 ±10.25 M
Altamira	5.37 ±0.22 FA	3.8 ±0.05 M	0.21 ±0.12 MB	5.76 ±0.76 B
Puente Hierro	5.76 ±0.02 MA	0.97 ±1.23 B	0.08 ±0.03 MB	6.11 ±0.02 B
La Alsacia	5.82± 0.08 MA	1.73 ±0.52 B	0.15 ±0.04 MB	8.14 ±0.54 B
R <sup>2</sup>	0.42	0.46	0.36	0.45
CV	6.52	43.8	64.7	39.51
Media	5.94 ±0.45	5.15 ±2.74	0.26 ±0.18	9.26 ±3.95

MO= %; CE= dS cm<sup>-1</sup>; CIC= cmol(+) kg<sup>-1</sup>; LA= ligeramente ácido; MA= moderadamente ácido; FA= fuertemente ácido; A= alto; M= medio; B= bajo; MB= muy bajo; R<sup>2</sup>= coeficiente de determinación; CV= coeficiente de variación (%); ±= desviación estándar.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) presentó valor promedio inferior a 10 cmol kg<sup>-1</sup>, considerado bajo, con una variación de 3.31 ±0.64 (muy bajo) a 15.35 ±10.25 (medio) cmol kg<sup>-1</sup> (Castro y Gómez, 2010). En general la CIC estuvo por debajo de 20 cmol kg<sup>-1</sup> (medio), con los valores más bajos en La Bolívar y Altamira (Cuadro 2).

El contenido de fósforo (P) en el suelo presentó valores superiores a 20 mg kg<sup>-1</sup> en 53% de los predios, lo que indicó un contenido de medio a alto, el resto de los predios evaluados (47%) presentaron contenidos de P bajos, siendo las veredas Las Hormas (11.16 ±3.49 mg kg<sup>-1</sup>) y La Alsacia (12.95 ±4.15 mg kg<sup>-1</sup>) las que registraron los menores contenidos (Figura 1C). El contenido de azufre (S) en el suelo fue inferior a 8 mg kg<sup>-1</sup> (bajo) en más de 90% de los predios (Figura 1D), reportando los menores valores en las veredas de La Judea y La Alsacia (2.58 ±0.45 mg kg<sup>-1</sup> y 2.6 ±0.61 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente) (Cuadro 3).

El contenido de calcio intercambiable (Ca), reportado en más del 70% de los predios mostró valores inferiores a 6 cmol kg<sup>-1</sup> (Figura 1E); es decir, que presentaron una condición de muy bajo a medio (Castro y Gómez, 2010), siendo muy bajo en la vereda La Bolívar (1.79 ±0.44 cmol kg<sup>-1</sup>) (Cuadro 3). Así mismo se encontró correlación significativa positiva ( $p < 0.007$ ;  $r = 0.41$ ) entre el contenido de Ca y el rendimiento del cultivo de arracacha, lo que indica que valores altos de Ca en el suelo favorecen el desarrollo del cultivo y la formación de raíces tuberosas.

Estos resultados son reafirmados por los obtenidos por Souza *et al.* (2017); Taiz y Zeige (2006), quienes obtuvieron los mayores valores de materia seca de corona y raíces tuberosas, luego de la aplicación de una fuente de fertilizante con calcio (Ca). La deficiencia de este nutriente (Ca) en el suelo conlleva a la reducción del crecimiento de la planta y sus raíces, además, de producir clorosis y muerte de los meristemos en las plantas (Souza y Madeira, 2008).

Los contenidos de magnesio en el suelo (Mg), fueron superiores a  $1.2 \text{ cmol kg}^{-1}$ , indicando contenidos altos de esta base de intercambio, resaltando que esta condición correspondió al 66% de los predios analizados (Figura 1F), las veredas que mostraron los menores contenidos de Mg fueron La Bolívar, Puente Hierro, Altamira, La Paloma y La Tigrera (Cuadro 3). El contenido de potasio (K) en el suelo presento valores inferiores a  $0.4 \text{ cmol kg}^{-1}$ , en 53% de los predios (Figura 1G), lo que indica contenidos bajos de este nutriente. Mientras que, los valores de K altos ( $>0.6 \text{ cmol kg}^{-1}$ ) se registraron en las veredas Las Hormas, La Despunta y La Leona (Cuadro 3).

En estudios de nutrición realizados en el cultivo de *Arracacia xanthorrhiza*, se encontró una alta dependencia del rendimiento de raíces fresca por hectárea respecto a los contenidos de potasio (K) y Mg en el suelo, resaltando que en la medida que aumentaba estos elementos en el suelo, se mejoraba la producción (Souza y Madeira, 2008; Chen y Fan, 2018; Mazetti *et al.* 2018). Estos resultados son corroborados en este estudio, donde se evidencia una alta dependencia ( $r=0.4383$ ) del rendimiento de raíces de las raíces tuberosas de arracacha respecto al potasio (K) en el suelo.

Los microelementos, el hierro (Fe) mostró valores altos ( $>100 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en 84% de los predios (Figura 1H), el valor promedio por vereda fue  $200.22 \pm 108.46 \text{ mg kg}^{-1}$ , con variación de  $108.93 \pm 33.5 \text{ mg kg}^{-1}$  (pan de azúcar) a  $390.66 \pm 93.45 \text{ mg kg}^{-1}$  (La Judea). Los micro-elementos Mn, Zn, Cu y B evidenciaron en 50% de los predios valores ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) inferiores al rango necesario para el desarrollo del cultivo: Mn ( $<5$ ), Zn ( $<3$ ), Cu ( $<2$ ) y B ( $<0.3$ ), (Figura 1I, Figura 1J, Figura 1K y Figura 1L) (Cuadro 4).

**Cuadro 4. Contenidos de micronutrientes del suelo en la zona de estudio.**

Vereda	Fe	Cu	Zn	Mn	B
El Águila	$178.65 \pm 57.61 \text{ A}$	$2.02 \pm 0.65 \text{ M}$	$2.21 \pm 1.13 \text{ B}$	$4.32 \pm 1.86 \text{ B}$	$0.28 \pm 0.09 \text{ B}$
Potosí	$171.82 \pm 45.91 \text{ A}$	$2.52 \pm 0.76 \text{ M}$	$2 \pm 1.05 \text{ B}$	$6.04 \pm 4.92 \text{ M}$	$0.33 \pm 0.09 \text{ M}$
Las Lajas	$250.25 \pm 177.51 \text{ A}$	$2.25 \pm 0.26 \text{ M}$	$2.4 \pm 1.77 \text{ B}$	$2.72 \pm 1.12 \text{ B}$	$0.31 \pm 0.04 \text{ M}$
La Leona	$252.38 \pm 147.44 \text{ A}$	$2.28 \pm 0.78 \text{ M}$	$5.03 \pm 3.4 \text{ M}$	$7.05 \pm 5.93 \text{ M}$	$0.39 \pm 0.12 \text{ M}$
Plata Monte.	$163.61 \pm 45.72 \text{ A}$	$1.73 \pm 1.5 \text{ B}$	$1.4 \pm 0.31 \text{ B}$	$3.47 \pm 0.94 \text{ B}$	$0.2 \pm 0.05 \text{ B}$
La Tigrera	$175 \pm 55.63 \text{ A}$	$4.86 \pm 3.9 \text{ A}$	$2.53 \pm 2.62 \text{ B}$	$3.73 \pm 2.42 \text{ B}$	$0.23 \pm 0.06 \text{ B}$
La Judea	$390.66 \pm 93.45 \text{ A}$	$5.33 \pm 2 \text{ A}$	$3.26 \pm 0.81 \text{ M}$	$7.63 \pm 3.36 \text{ M}$	$0.19 \pm 0.03 \text{ B}$
Cedral	$152.44 \pm 102.61 \text{ A}$	$1.95 \pm 1.34 \text{ B}$	$1.1 \pm 0.14 \text{ B}$	$6.69 \pm 5.95 \text{ M}$	$0.22 \pm 0.07 \text{ B}$
Las Hormas	$358.88 \pm 213.71 \text{ A}$	$2.16 \pm 1.05 \text{ M}$	$3.08 \pm 2.18 \text{ M}$	$4.37 \pm 3.07 \text{ B}$	$0.24 \pm 0.09 \text{ B}$
La Bolívar	$175 \pm 85.71 \text{ A}$	$3.76 \pm 2.4 \text{ M}$	$1.1 \pm 0.87 \text{ B}$	$6.53 \pm 1.46 \text{ M}$	$0.25 \pm 0.03 \text{ B}$
La Paloma	$228 \pm 25.41 \text{ A}$	$2 \pm 0.86 \text{ M}$	$1.42 \pm 0.45 \text{ B}$	$7.4 \pm 3.69 \text{ M}$	$0.22 \pm 0.08 \text{ B}$
La Despunta	$140.4 \pm 41.92 \text{ A}$	$2.23 \pm 0.67 \text{ M}$	$2.95 \pm 1.75 \text{ B}$	$4.1 \pm 2.42 \text{ B}$	$0.31 \pm 0.1 \text{ M}$
Rincón Placer	$181.7 \pm 132.75 \text{ A}$	$2.08 \pm 0.65 \text{ M}$	$3.47 \pm 4.62 \text{ M}$	$4.08 \pm 2.19 \text{ B}$	$0.26 \pm 0.17 \text{ B}$
Pan Azúcar	$108.93 \pm 33.5 \text{ A}$	$1.57 \pm 0.47 \text{ B}$	$2.14 \pm 0.71 \text{ B}$	$3.56 \pm 2.56 \text{ B}$	$0.25 \pm 0.05 \text{ B}$
Altamira	$239.66 \pm 48.52 \text{ A}$	$4.53 \pm 3.1 \text{ A}$	$1.63 \pm 1.27 \text{ B}$	$7.46 \pm 2.55 \text{ M}$	$0.26 \pm 0.09 \text{ B}$
Puente Hierro	$154 \pm 20.34 \text{ A}$	$1.2 \pm 0.89 \text{ B}$	$1 \pm 0.35 \text{ B}$	$2.9 \pm 1.23 \text{ B}$	$0.12 \pm 0.05 \text{ B}$

Vereda	Fe	Cu	Zn	Mn	B
La Alsacia	191.54 ±35.53 A	2.86 ±0.75 M	1.5 ±0.35 B	5.8 ±1.46 M	0.2 ±0.09 B
R <sup>2</sup>	0.46	0.38	0.38	0.44	0.49
CV	49.72	66.59	79.01	63.23	32.35
Media	200.22 ±108.46	2.6 ±1.77	2.37 ±1.92	5.02±3.33	0.26 ±0.09

Fe, Cu, Zn, Mn y B= mg kg<sup>-1</sup>; A= alto; M: medio; B= bajo; R<sup>2</sup>= coeficiente de determinación; CV= coeficiente de variación (%); ±= desviación estándar.

El análisis de componentes principales (ACP) de los 19 indicadores químicos en los predios del sistema de producción agrícola (arracacha), mostró que cinco (5) componentes principales (CP) fue capaces de explicar 80.4% de la varianza acumulada (Cuadro 5). El componente uno (1) explicó el 28.14%, siendo los auto vectores de mayor peso la CIC (0.95) y Ca (0.93). El componente dos (2) explicó 21.3%, siendo las relaciones catiónicas Ca/K (0.93), Mg/K (0.85) y (Mg+Ca)/K (0.95) quienes explicaron mejor este comportamiento. El componente tres (3) denotó 14.3%, siendo dominado por los elementos menores Fe, Zn y Mn que mejor explicaron el comportamiento del suelo (Cuadro 5). El componente cuatro (4) observó 8.88%, las variables relacionadas con S y pH fueron las de mayor relevancia. Para el caso del componente cinco (5) refirió 7.8% de la varianza total, siendo la relación catiónica Ca/Mg la que mejor explicación presentó (0.92) (Cuadro 5).

**Cuadro 5. Componentes principales de parámetros químicos de suelo.**

Indicador	Vectores propios					Comunalidades
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	
pH	-0.02	-0.14	0.43	<u>0.77</u>	-0.32	0.91
CE	0.8	0.02	-0.2	-0.09	-0.04	0.7
MO	0.44	-0.48	-0.09	0.07	0.12	0.46
P	0.14	-0.31	0.68	0.24	-0.04	0.65
S	-0.15	-0.18	0.15	<u>0.83</u>	0.04	0.78
Ca	<u>0.93</u>	0.18	0.03	0.02	0.14	0.92
Mg	0.67	0.15	0.24	0.07	-0.63	0.94
K	0.42	-0.63	0.4	0.36	-0.18	0.9
Na	-0.04	0.13	0.17	-0.71	-0.06	0.56
CICE	<u>0.95</u>	0.11	0.13	0.07	-0.04	0.94
Fe	-0.14	0.05	<u>0.79</u>	-0.09	0.04	0.67
Mn	-0.21	0.13	<u>0.68</u>	0.47	-0.27	0.84
Zn	0.37	-0.18	<u>0.72</u>	0.3	-0.14	0.81
Cu	-0.04	0.1	0.45	-0.23	0.54	0.58
B	0.38	-0.06	0.3	0.7	-0.08	0.74
Ca/Mg	0.11	-0.06	-0.17	0.03	<u>0.92</u>	0.9
Mg/K	0.13	<u>0.85</u>	0	-0.14	-0.41	0.95
Ca/K	0.21	<u>0.93</u>	-0.07	-0.11	0.14	0.96
(Ca+Mg)/K	0.2	<u>0.95</u>	-0.06	-0.12	0.04	0.97

Los datos subrayados fueron seleccionados para la obtención del conjunto mínimo de datos (CMD).

Luego de identificar el conjunto mínimo de datos (CMD) (Cuadro 5), apoyados con el análisis de correlación de Pearson, se seleccionó el indicador de mayor peso dentro de cada componente principal (en los casos que el CP mostrara más de un indicador) se tuvo en cuenta correlación significativa entre sí. De CP1, se seleccionó CIC por su peso dentro del componente y su alta correlación con el Ca ( $r= 0.96$ ). En CP2, se seleccionó la relación catiónica (Ca+Mg)/K (auto vector= 0.95) y alta correlación con Mg/K y Ca/K ( $r= 0.85$  y  $0.99$ , respectivamente). CP 3, fue seleccionado hierro (Fe), quien presento correlaciones significativas con Mn y Zn ( $r= 0.45$  y  $0.44$ , respectivamente). Para el caso del CP4 y CP5, fueron seleccionadas las propiedades químicas S (correlación inversa significativa con pH  $r= -0.41$ ) y la relación catiónica Ca/Mg, respectivamente.

## Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que el municipio de Cajamarca presenta suelos con condiciones adecuadas para el establecimiento del del sistema productivo de arracacha, resaltando que 19% de las veredas presentan algunas limitantes químicas de suelo, relacionadas con pH muy ácidos (La Bolívar y Altamira), deficiente contenido de MO (Puente hierro y La Alsacia), bajo contenido de bases de intercambio como el calcio (Ca) en las veredas de La Bolívar, Altamira, Las Hormas y las Palomas y de magnesio (Mg) en La Bolívar.

El rendimiento de raíces tuberosas de arracacha mostró alta dependencia del pH y de los contenidos de MO, asimismo, se encontró que el contenido de Ca tiene correlación significativa positiva con el rendimiento del cultivo, al igual que los contenidos de K y Mg. El micro-elemento, Mn, Zn, Cu y B, no afectaron significativamente el desarrollo del cultivo de arracacha. El equilibrio entre las relaciones catiónicas (Ca/Mg, Ca/K y (Ca+Mg)/K) es relevante para garantizar altos rendimiento del cultivo de arracacha.

## Agradecimientos

A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), por su apoyo para el desarrollo del proyecto Consolidación del núcleo de producción de semilla seleccionada de arracacha de variedades mejoradas y regionales en el cañón del Anaimé (Tolima) y otras regiones productoras. A Juan Felipe Ossa Yopez por la traducción de los apartados del manuscrito.

## Literatura citada

- Atencio, S. L. M.; Villamil, C. J. E.; Garnica, M. J. P.; Martínez, R. A. M. y Ossa, Y. J. F. 2021. Análisis de alternativas de producción de semilla vegetativa de arracacia *xanthorrhiza* bancroft en Tolima. Colombia. Cienc. Agric. 18(3):1-14. <https://doi.org/10.19053/01228420.v18.n3.2021.13529>.
- Aguilar, B. S. 2005. Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud. Salud en Tabasco. 11(1-2):333-338. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48711206>.
- Alvarado, Á. G. y Ochoa, L. 2010. Tecnologías locales de producción de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* Bancroft) en el municipio de Boyacá, departamento de Boyacá. Rev. U. D. C. Act. & Div. Cient. 13(1):125-133. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0152157>.
- Amaya, R. J. E. y Julca, H. J. L. 2006. "Arracacha" (*A. xanthorrhiza* Bancroft). Biodiversidad y conservación de los recursos fitogenéticos andinos. Gerencia regional de recursos naturales y conservación del medio ambiente. Gobierno Regional La Libertad. 9-10 pp.

- Bray, R. H. and Kurtz, L. T. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59(1):39-46. <https://doi.org/10.1097/00010694-194501000-00006>.
- Castro, F. H. E. y Gómez, S. M. I. 2010. Fertilidad de suelos y fertilizantes. *In: Burbano, O. H. y Mojica, F. S. (Ed.). Ciencia de suelo principios básicos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.* 217-298 pp.
- Chapman, H. D. 2016. Cation-exchange capacity. *In: Norman, A. G. (Ed.). Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties.* 9.2.2 891-901 pp. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c6>.
- Chen, H. and Fan, X. 2018. Effects of magnesium remobilization and allocation on banana plant growth. *J. Plant Nutr.* 41(10):1312-1320. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1450422>.
- Chaali, N.; Ouazaa, S.; Jaramillo, B. C. I.; Araujo, C. G. A. and Ávila, P. E. Á. 2020. Edaphoclimatic characterization and crop water requirement of arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* bancroft) roots in upland production areas. *Sci. Hortic.* 272:109533. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109533>.
- Garnica, M. J. P.; Villamil, C. J. E.; Vargas, B. Á. M.; Rodríguez, R. O. J. y Atencio, S. L. M. 2021. Modelo productivo de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.) Agrosavia la 22 para la región andina de Colombia. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Mosquera, Colombia. 14-25 pp. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.nbook.7404500>.
- Gómez, K. A. and Gomez, A. A. 1984. Statistical procedures for agricultural research. John Wiley & Sons. 130-170 pp.
- Heid, D. M.; Zárate, N. A. H.; Torales, E. P.; Luqui, L. de L.; de Souza, S. A. and Abrão, M. S. 2019. Doses of organic residues in soil mulch influence productivity and profitability of peruvian carrot. *Idesia (Arica).* 37(3):55-63. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019000300055>.
- Hendershot, W. X.; Lalonde, H. X. and Duquette, M. X. 2007. Ion exchange and exchangeable cations. Carter, M. R. and Gregorich, E. G. (Ed.). *Soil sampling and methods of analysis. Canadian Soc. Soil Sci.* 197-207 pp.
- Holdridge, L. R. 1982. Ecología basada en zonas de vida. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 17-35 pp.
- ICONTEC. 2007. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Norma técnica colombiana NTC 5526. Calidad de suelo. Determinación de micronutrientes disponibles: cobre, zinc, hierro y manganeso. 1-8 pp.
- ICONTEC. 2011. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Norma técnica colombiana NTC 5404. Calidad del suelo. Determinación de boro. 1-8 pp.
- ICONTEC. 2016. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Norma Técnica Colombiana NTC 5349. Calidad de suelo. Determinación de las bases cambiables: método del acetato amonio 1M, PH 7. 1.9 pp.
- IGAC. 2004. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Capítulo III. Descripción de suelos. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento del Tolima. 80-110 pp.
- Mazetti, F. A.; Loli, G. E.; Leonel, M.; Helena, S. O. and Mota, L. H. S. O. 2018. Produtividade e qualidade de raízes da mandioquinha-salsa em diferentes níveis de adubação NPK. *Colloquium Agrariae.* 14(3):194-203. <https://doi.org/10.5747/ca.2018.v14.n3.a242>.
- MINTIC. 2019. Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones Evaluaciones Agropecuarias Municipales EVA. <https://www.datos.gov.co/Agricultura-y-Desarrollo-Rural/Evaluaciones-Agropecuarias-Municipales-EVA/2pnw-mmge/data>.

- Morillo, E.; Madeira, N. R. and Jaimez, R. E. 2020. Arracacha. Geoffriau, E. and Simon, P. W. (Ed.). Carrots and related Apiaceae crops. CAB Internacional. 245-253 pp. <https://doi.org/10.1079/9781789240955.0000>.
- Muñoz, A. L.; Alvarado, A. A. y Almanza, M. P. 2015. Caracterización preliminar del cultivo de arracacha *Arracacia xanthorrhiza* Bancroft en el departamento de Boyacá. Rev. Cienc. Agríc. 32(1):3-11. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22267/rcia.153201.20>.
- Nelson, D. W. and Sommers, L. E. 2018. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Sparks, M. E.; Page, D. L.; Helmke, A. L.; Loeppert, P. A.; Soltanpour, R. H.; Tabatabai, P. N. and Johnston, M. A. (Ed.). Methods of soil analysis, part 3. Chemical methods. 961-1010 pp. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>.
- Nunes, A. R. A.; Fernandes, A. M.; Leonel, M.; Garcia, E. L.; Magolbo, L. A. and Carmo, E. L. 2016. Nitrogênio no crescimento da planta e na qualidade de raízes da mandiocinha-salsa. Ciência Rural. 46(2):242-247. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20150339>.
- Souza, L. M. C.; Souza, C. M., and Finger, F. L. 2017. Capacity to absorb mineral nutrients from arracacha roots (*Arracacia xanthorrhiza* Bancroft). Acta Horticulturae. 1153:35-40. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1153.6>.
- Taiz, L. y Zeige, E. 2006. Fisiología vegetal volumen 1. Universitat Jaume. 550-576 pp.
- UMATA. 2018. Unidad Municipal de Asistencia Técnica Agropecuaria. Censo de producción de arracacha del municipio de Cajamarca-departamento del Tolima. 15-25 pp.