

ANÁLISIS MULTIELEMENTAL DE HOJAS DE ANACARDO MEDIANTE ICP-OES: SUBVENCIONES PARA LA SOSTENIBILIDAD DEL CULTIVO DE ANACARDO EN RORAIMA

MULTIELEMENTAL ANALYSIS OF CASHEW LEAVES BY ICP-OES: SUBSIDIES
FOR THE SUSTAINABILITY OF CASHEW FARMING IN RORAIMA.

ANÁLISE MULTIELEMENTAR DE FOLHAS DE CAJUEIRO POR ICP-OES:
SUBSÍDIOS PARA A SUSTENTABILIDADE DA CAJUCULTURA RORAIMENSE

Miguel Sales Porto de Sousa¹, Hyanameyka Evangelista de Lima Primo²

DOI: 10.54899/dcs.v22i84.3709

Recibido: 01/11/2025 | Aceptado: 03/11/2025 | Publicación en línea: 14/11/2025.

RESUMEN

Este estudio evaluó la eficacia de tres métodos de digestión ácida para determinar la composición mineral de hojas de anacardo (*Anacardium occidentale* L.) cultivado en Roraima, mediante espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). El anacardo, especie nativa de Brasil, tiene gran relevancia económica y ambiental, y representa una alternativa sostenible para el desarrollo rural en el Lavrado de Roraima. El análisis foliar es una herramienta precisa para el diagnóstico nutricional, que permite evaluar la absorción y distribución de nutrientes en condiciones de limitación o manejo hídrico. Las muestras, recolectadas de plantas no tratadas, se sometieron a tres métodos de digestión distintos: el método 1 utilizó ácido nítrico con calentamiento controlado; el método 2 consistió en digestión en reposo con calentamiento moderado; y el método 3 en digestión en seco seguida de extracción con ácido nítrico diluido. Los resultados revelaron deficiencias de zinc (Zn), hierro (Fe) y boro (B) en las hojas. El método 1 fue más eficiente en la extracción de Zn, Fe y manganeso (Mn), mientras que el método 3 mostró un mejor desempeño en la extracción de B. La digestión ácida resultó crucial para la confiabilidad analítica, y la espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) demostró alta sensibilidad y precisión, brindando apoyo técnico para el manejo nutricional sostenible de los árboles de anacardo en condiciones amazónicas.

Palabras clave: Anacardo. ICP. Roraima. *Anacardium*. Lavrado.

ABSTRACT

This study evaluated the efficiency of three acid digestion methods in determining the mineral composition of cashew leaves (*Anacardium occidentale* L.) cultivated in Roraima, using Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). The cashew tree, a

¹ Estudiante de máster en Agroecología, Ambiente, Sociedade e Amazônia, Universidade Estadual de Roraima (UERR), Boa Vista, Roraima, Brasil. Correo electrónico: miguelsp.sousa@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6942-3093>

² Doctora en Fitopatología, Universidade Federal de Viçosa, Boa Vista, Roraima, Brasil.
Correo electrónico: hyanameyka.lima@embrapa.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0595-5039>

native species of Brazil, has great economic and environmental relevance, representing a sustainable alternative for rural development in the Cerrado of Roraima. Foliar analysis is a precise tool for nutritional diagnosis, allowing the evaluation of nutrient absorption and distribution under conditions of water limitation or management. The samples, collected from untreated plants, were subjected to three distinct digestion methods: method 1 used nitric acid under controlled heating; method 2 involved digestion at rest and moderate heating; and method 3 consisted of dry digestion followed by extraction with diluted nitric acid. The results revealed deficiencies in zinc (Zn), iron (Fe), and boron (B) in the leaves. Method 1 was more efficient in extracting Zn, Fe, and manganese (Mn), while method 3 showed better performance in extracting B. Acid digestion proved crucial for analytical reliability, and inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) demonstrated high sensitivity and precision, providing technical support for the sustainable nutritional management of cashew trees in Amazonian conditions.

Keywords: Cashew. ICP. Roraima. Anacardium. Lavrado.

RESUMO

O presente estudo avaliou a eficiência de três métodos de digestão ácida na determinação da composição mineral de folhas de cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) cultivadas em Roraima, por meio da Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES). O cajueiro, espécie nativa do Brasil, possui grande relevância econômica e ambiental, representando uma alternativa sustentável para o desenvolvimento rural no Lavrado de Roraima. A análise foliar é uma ferramenta precisa para o diagnóstico nutricional, permitindo avaliar a absorção e distribuição de nutrientes em condições de limitação edáfica ou hídrica. As amostras, coletadas de plantas sem manejo, foram submetidas a três métodos distintos de digestão: o método 1 utilizou ácido nítrico sob aquecimento controlado; o método 2 envolveu digestão em repouso e aquecimento moderado; e o método 3 consistiu em digestão a seco seguida de extração com ácido nítrico diluído. Os resultados revelaram deficiência de zinco (Zn), ferro (Fe) e boro (B) nas folhas. O método 1 foi mais eficiente na extração de Zn, Fe e manganês (Mn), enquanto o método 3 apresentou melhor desempenho na extração de B. A digestão ácida mostrou-se determinante para a confiabilidade analítica, e o ICP-OES comprovou alta sensibilidade e precisão, fornecendo subsídios técnicos para o manejo nutricional sustentável do cajueiro em condições amazônicas.

Palavras-chave: Caju. ICP. Roraima. Anacardium. Lavrado.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUCCIÓN

El análisis foliar es una herramienta esencial en el manejo nutricional de los cultivos, ya que proporciona una visión precisa del estado real de absorción y distribución de nutrientes en las plantas, yendo más allá de la simple evaluación de su disponibilidad en el suelo. En

condiciones que limitan la absorción radicular —como suelos pobres y compactados o suelos con estrés hídrico— la hoja se convierte en un indicador crucial para el diagnóstico y la corrección nutricional (Lokshin et al., 2025; Soni et al., 2023).

El árbol de anacardo (*Anacardium occidentale* L.), especie nativa de Brasil, posee gran importancia económica, nutricional e industrial, al ser fuente de compuestos bioactivos y nutrientes esenciales. Pertenece a la familia Anacardiaceae, que incluye especies como *Pistacia vera* y *Spondias* spp. (Narayanappa et al., 2025). El árbol de anacardo desempeña un papel relevante en el desarrollo socioeconómico de las comunidades rurales, especialmente en regiones tropicales como el Lavrado de Roraima (Sousa; Primo, 2025). La nuez de anacardo, con alto valor nutricional y comercial, y la manzana de anacardo, con propiedades antiinflamatorias, antioxidantes y antidiabéticas, se destacan como productos con alto potencial agroindustrial (Baffour-ata et al., 2025; Aslam et al., 2024).

A pesar de este potencial, los estudios sobre la composición mineral de las hojas de anacardo en condiciones amazónicas son escasos, especialmente en Roraima, donde este cultivo representa una alternativa sostenible para la diversificación productiva y el uso racional de los recursos naturales (Sousa; Primo, 2025). En este sentido, el análisis foliar es fundamental para el diagnóstico nutricional, permitiendo la adopción de estrategias de fertilización más precisas y ambientalmente adecuadas.

Por lo tanto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de tres métodos de digestión ácida para determinar la composición elemental de las hojas de anacardo cultivadas en Roraima, utilizando espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). Esta técnica, reconocida por su alta sensibilidad y capacidad multielemental, depende de una digestión ácida efectiva, capaz de promover la solubilización completa de la matriz vegetal y la eliminación de la materia orgánica, asegurando resultados analíticos precisos y reproducibles (Senila, 2024). Los resultados buscan identificar el método más eficiente para la extracción de nutrientes y apoyar prácticas de manejo nutricional que promuevan una mayor productividad y el fortalecimiento sostenible del cultivo de anacardo en la región norte.

MARCO TEÓRICO

El cultivo de anacardo (*Anacardium occidentale* L.) se ha consolidado como una actividad estratégica para el desarrollo sostenible del estado de Roraima, integrando dimensiones

económicas, sociales y ambientales en un contexto de uso racional de los recursos naturales. La especie exhibe una amplia adaptabilidad a las condiciones del Lavrado, la sabana amazónica más grande de Brasil, caracterizada por suelos bien drenados, alta luminosidad y marcada estacionalidad del agua. Estas características, aunadas a la resistencia y resiliencia fisiológica del árbol de anacardo, favorecen su expansión en sistemas agroecológicos y familiares, especialmente en comunidades indígenas y rurales que buscan conciliar la generación de ingresos, la seguridad alimentaria y la conservación ambiental (Weiduschat & Pereira Lima, 2024). Además de representar una alternativa productiva de bajo impacto, el cultivo de anacardo contribuye a la valoración de los recursos naturales locales y al fortalecimiento de la economía comunitaria, configurándose como un vector de inclusión social y uso sostenible de la biodiversidad amazónica (Almeida & Souza, 2024).

A pesar de su potencial socioeconómico y ecológico, el desempeño productivo del cultivo en Roraima aún enfrenta limitaciones derivadas de factores estructurales y técnicos, como la escasa adopción de tecnologías de manejo y la falta de información sobre la nutrición mineral de la especie bajo las condiciones edafoclimáticas amazónicas (Villegas-González & Gutiérrez-Martínez, 2021). La escasez de estudios sistemáticos sobre el estado nutricional de los árboles de anacardo dificulta el establecimiento de programas adecuados de fertilización y manejo del suelo, lo que resulta en una baja productividad y una calidad inferior de la fruta. En este contexto, el análisis foliar se destaca como una herramienta esencial para el diagnóstico nutricional, permitiendo evaluar el equilibrio entre macro y micronutrientes y orientar prácticas agrícolas más racionales y ambientalmente sostenibles.

La etapa de preparación de la muestra es un punto crítico en el proceso analítico, ya que influye directamente en la exactitud y confiabilidad de los resultados. En general, esta etapa comprende procedimientos de digestión o extracción, cuyo objetivo es mineralizar la fracción orgánica y solubilizar los analitos en formas inorgánicas cuantificables (Almeida et al., 2025). En este sentido, el uso de la espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) representa un avance significativo en el análisis químico de tejidos vegetales, dado que esta técnica es ampliamente reconocida por su alta sensibilidad, precisión y capacidad de detección multielemental. La espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) se ha utilizado ampliamente en estudios de nutrición vegetal, permitiendo la determinación simultánea de micronutrientes —como hierro, zinc, cobre, manganeso y calcio— con excelente reproducibilidad y bajos límites de detección (Silva et al.,

2025; Santos et al., 2024; Ferreira et al., 2025). Además de su eficiencia analítica, la técnica ofrece ventajas ambientales, ya que permite optimizar el uso de reactivos y reducir la generación de residuos químicos, en consonancia con los principios de la química verde y los objetivos de sostenibilidad en la investigación agroambiental (Ferreira et al., 2025).

La aplicación de ICP-OES a muestras de hojas de árboles de anacardo cultivados en Roraima permite comprender la dinámica de nutrientes bajo las condiciones edafoclimáticas amazónicas, brindando apoyo técnico para el desarrollo de estrategias de manejo nutricional más eficientes y sostenibles. La información obtenida mediante este enfoque es fundamental para promover el uso racional de fertilizantes, prevenir desequilibrios nutricionales y reducir los impactos ambientales asociados con un manejo inadecuado del suelo. Además, el conocimiento detallado del perfil elemental de la planta contribuye a los programas de mejoramiento genético y a la selección de genotipos mejor adaptados a las condiciones locales, fortaleciendo la resiliencia del cultivo de anacardo ante las variaciones climáticas regionales.

La integración entre el uso de tecnologías analíticas avanzadas y prácticas agrícolas sostenibles constituye un hito para el fortalecimiento del cultivo de anacardo en Roraima. El uso de ICP-OES, combinado con la capacitación técnica de los productores y la adopción de sistemas de producción ambientalmente responsables, puede impulsar el desarrollo regional, transformando el cultivo de anacardo en una actividad económicamente viable y ecológicamente equilibrada. Así, el avance del conocimiento técnico y científico sobre la nutrición mineral de los árboles de anacardo en Roraima representa no solo un instrumento de innovación tecnológica, sino también un motor clave del cambio. También constituye un pilar fundamental para la consolidación de la agricultura sostenible en el extremo norte de Brasil.

METODOLOGÍA

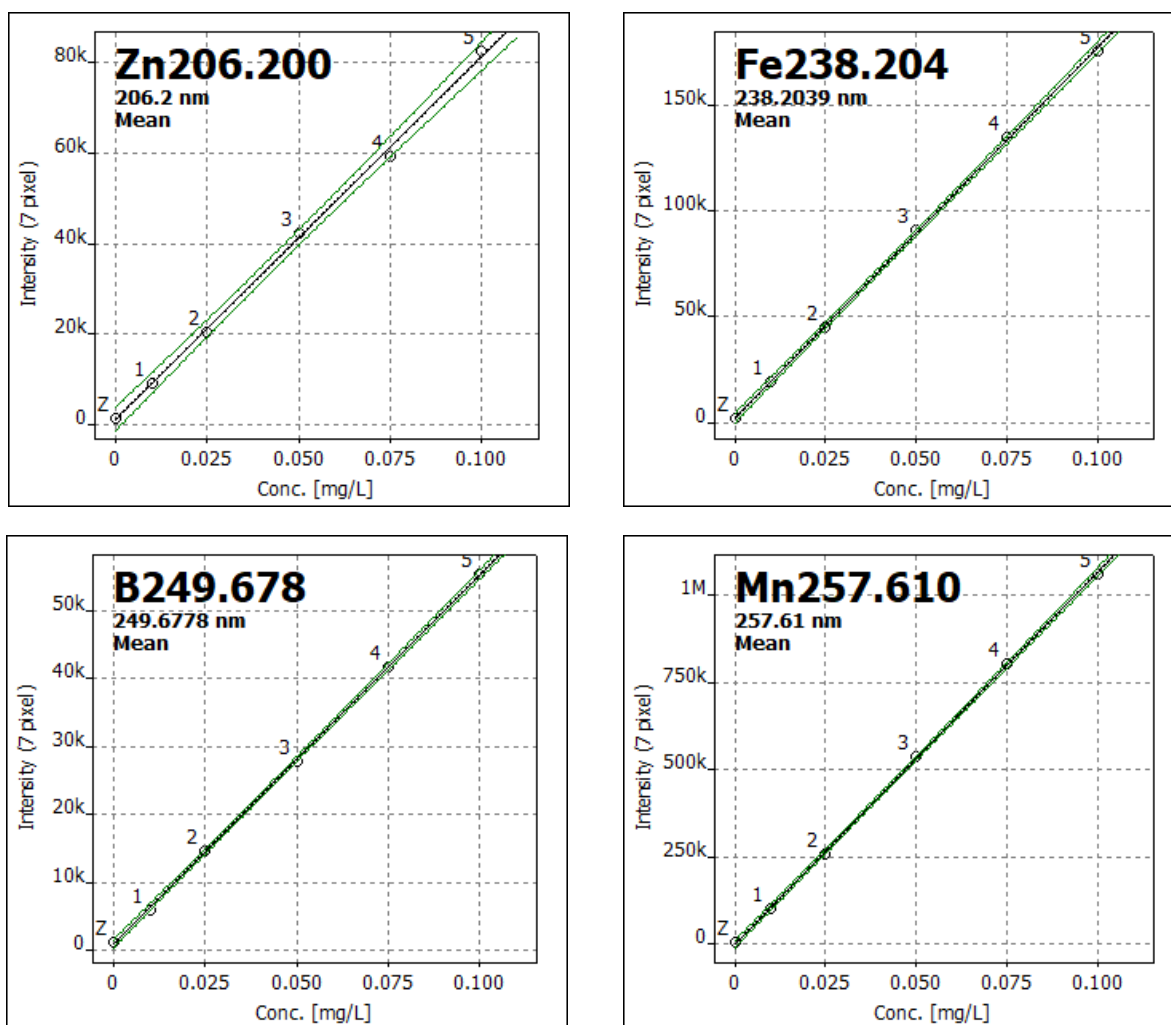
La determinación elemental se realizó mediante espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), modelo PlasmaQuant 9100 (Analytik Jena, Turingia, Alemania). El equipo constaba de una cámara de nebulización ciclónica de vidrio borosilicato, un soplete V-Shuttle desmontable con inyector de cuarzo de 2 mm, un nebulizador concéntrico de 1 mL/min y tubos de bomba de PVC. El control operativo y el procesamiento de datos se llevaron a cabo con el software ASpect PQ 1.3.2.0, y se utilizó argón analítico 5.0 (White Martins, Río de Janeiro, Brasil) como gas de generación de plasma. Las muestras se pesaron en

una balanza analítica Shimadzu UX620H (Tokio, Japón), con una precisión de 0,001 g y una capacidad máxima de 620 g. La digestión en seco se llevó a cabo en un horno de mufla digital SPlabor SP-1200 (São Paulo, Brasil), con una temperatura máxima de 1200 °C, utilizando crisoles de porcelana de 50 mL. El material filtrante consistió en papel de filtro cuantitativo Whatman 42 (15 mm de diámetro, Merck, Darmstadt, Alemania). Se utilizó agua ultrapura obtenida mediante un sistema Milli-Q (Millipore, EE. UU.), con una resistividad de 18 MΩ cm. El ácido empleado fue HNO₃ de grado analítico (65 % p/p, 1,4 kg/L, Merck), y la solución estándar multielemental para ICP (1,045 g/cm³ a 20 °C, Merck) se diluyó adecuadamente para la construcción de las curvas de calibración. Las soluciones de calibración se prepararon en un medio acidificado con HNO₃ al 1,25 % (v/v). Se recolectaron muestras de árboles de anacardo común (*Anacardium occidentale* L.), sin manejo, ubicados en la región de Boa Vista, Roraima, Brasil, donde la temperatura media anual es de 23,5 °C y la precipitación media anual es de 146,3 mm (Inmet, 2024). Las hojas se lavaron con agua destilada, se secaron a 60 °C hasta alcanzar un peso constante, se molieron y se tamizaron a través de una malla de 20, y posteriormente se almacenaron hasta la etapa de digestión (Silva, 2009). La extracción de elementos químicos del tejido vegetal se realizó mediante tres métodos distintos. En el primer método, se añadió una alícuota de 10 mL de ácido nítrico a 1 g de la muestra vegetal, seguida de digestión a una temperatura constante de 140 °C (Zarcinas, Cartwright & Spouncer, 1987). Fue necesaria la agitación durante el proceso para controlar la formación de espuma. La digestión continuó hasta que el volumen se redujo a aproximadamente 1 mL de ácido residual. La solución se enfrió y se diluyó hasta un volumen final de 20 mL con ácido nítrico al 1 % (v/v). El segundo método consistió en pesar 1 g de la muestra vegetal, añadir 10 mL de ácido nítrico y dejar reposar la mezcla durante la noche. Posteriormente, la muestra se calentó a 125 °C durante 4 horas. Tras enfriarla, la solución se diluyó primero a 12,5 mL con ácido nítrico y luego a 50 mL con agua destilada (Halvin & Soltanpour, 1980). En el tercer método, se pesaron 500 mg de la muestra vegetal y se transfirieron a un crisol de porcelana, que se calentó gradualmente en un horno de mufla hasta alcanzar los 500 °C, temperatura que se mantuvo durante 3 horas antes de apagar el fuego. Tras enfriar el crisol, se añadieron 25 mL de una solución de ácido nítrico 1 M para la extracción elemental (Silva, 2009).

RESULTADO Y DISCUSIÓN

La evaluación de los métodos de extracción comenzó con la elaboración de curvas de calibración para cada elemento analizado mediante ICP. Como se muestra en la Figura 1, se observó una alta linealidad en todas las curvas, lo que indica una buena correlación entre la concentración y la respuesta instrumental.

Figura 1. Curvas de calibración para el análisis de elementos.

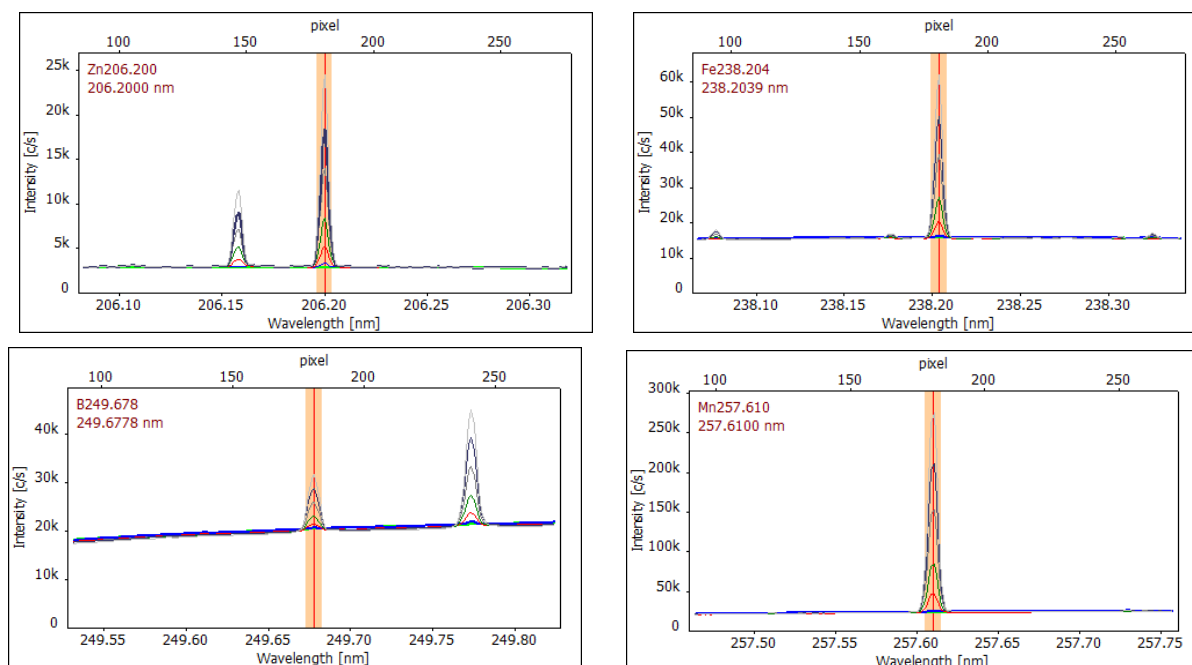


Fuente: Los propios autores.

La sensibilidad analítica del método se evaluó determinando los límites de detección (LD) y cuantificación (LC), los cuales variaron según las propiedades fisicoquímicas y el comportamiento espectral de cada elemento. En todos los casos, se observó una relación lineal y proporcional entre la intensidad de la señal analítica y la concentración de los analitos (Figura 2),

lo que demuestra la precisión, exactitud y robustez del procedimiento analítico adoptado.

Figura 2. Intensidad de las curvas de calibración de los elementos.



Fuente: Los propios autores.

La Tabla 1 presenta los coeficientes de correlación (R^2), los límites de detección (LD) y los límites de cuantificación (LC) obtenidos para las curvas de calibración de los elementos analizados. Las curvas calibradas mostraron una excelente linealidad, con valores de R^2 entre 0,9999 y 0,9997, lo que indica una fuerte correlación entre la concentración del analito y la respuesta instrumental. La alta sensibilidad del método se evidenció por los bajos valores de LD ($< 0,0034 \text{ mg L}^{-1}$) y LC ($< 0,0123 \text{ mg L}^{-1}$), lo que refleja la capacidad del sistema analítico para detectar y cuantificar concentraciones extremadamente bajas de los elementos. Estos resultados confirman la idoneidad y fiabilidad del procedimiento de calibración empleado, garantizando la precisión y reproducibilidad en las determinaciones elementales.

Tabla 1. Límite de detección (LD), límite de cuantificación (LC), curva de calibración (y) y linealidad.

Elementos	y	R^2	LD (mg/L)	LC (mg/L)
Zn	$1200.6721+800825.01x$	0.9997	0,0034	0,0123
Fe	$2087.8115+1751593.8x$	0.9999	0,0013	0,0050
B	$880.55849+544322.19x$	0.9997	0,0011	0,0041
Mn	$-1784.727+10668566x$	0.9997	0,0010	0,0036

Fuente: Los propios autores

Los elementos zinc (Zn), hierro (Fe), boro (B) y manganeso (Mn) se determinaron mediante tres métodos diferentes de extracción ácida. En el primer método, se digirió 1 g de la muestra con 10 mL de ácido nítrico (HNO₃) a 140 °C, según lo descrito por Zarcinas, Cartwright y Spouncer (1987). En el segundo método, también se utilizó 1 g de muestra y 10 mL de HNO₃, y la digestión se realizó a 124 °C durante un breve periodo, de acuerdo con Halvin y Soltanpour (1980). En el tercer método, se calcinaron previamente 500 mg de la muestra en un horno de mufla a 500 °C durante 4 horas; tras el enfriamiento, se añadieron 25 mL de una solución de HNO₃ 1 mol L⁻¹ para favorecer la extracción de los elementos, según Silva (2009). La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos para cada uno de los métodos evaluados.

Tabla 2. Determinación de elementos químicos y desviación estándar (DE).

Elementos	Método 1 (mg/L)	DE (mg/L)	Método 2 (mg/L)	DE (mg/L)	Método 3 (mg/L)	DE (mg/L)
Zn	0.7219	0.0146	0.2427	0.0002	0.1901	0.0013
Fe	3.6200	0.0017	0.5670	0.0006	0.5928	0.0048
B	0.1440	0.0000	0.1002	0.0002	0.2460	0.0002
Mn	2.7190	0.0010	0.5961	0.0150	0.3643	0.0000

Fuente: Los propios autores

Si bien se encuentran en menor cantidad que los macronutrientes, los micronutrientes desempeñan funciones vitales en el metabolismo vegetal, influyendo directamente en el crecimiento, el desarrollo y la productividad de las plantas. El zinc (Zn) desempeña un papel fundamental en diversos procesos fisiológicos y bioquímicos de las plantas, participando en la síntesis de ácidos nucleicos, citocromos y clorofila, además de actuar como cofactor enzimático en numerosas reacciones metabólicas relacionadas con la producción de lípidos y carbohidratos. Este micronutriente también es esencial para la formación y maduración del tallo, el mantenimiento de la integridad de la membrana celular y la activación de la enzima ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa (Rubisco), fundamental para el proceso fotosintético y para incrementar la tasa de asimilación de carbono (Silva, Oliveira y Santos, 2023; Ramesh y Gilliam, 2023).

Mediante los métodos de digestión ácida evaluados en este estudio, se observó una mayor eficiencia en la extracción de zinc (Zn) con el primer método, descrito por Zarcinas, Cartwright y Spouncer (1987). Como se muestra en la Tabla 3, al comparar los resultados obtenidos con el valor de referencia para el árbol de anacardo común, se encontró una diferencia entre las concentraciones, posiblemente relacionada con la ausencia de un manejo nutricional adecuado y

variaciones en las condiciones edáficas.

Tabla 3. Concentración de Zn en las hojas de anacardo

Zn (mg/kg)	Desviación estándar (mg/kg)	Autores
14,44	0,29	Trabajo propio de los autores, método 1.
12,14	0,01	Trabajo propio de los autores, método 2.
9,51	0,07	Trabajo propio de los autores, método 3.
25,00	-	(HAAG et al., 1975).

Fuente: Los propios autores y Haag et al., (1975).

En la literatura no se encontraron registros específicos sobre las concentraciones de zinc (Zn) foliar en árboles de anacardo (*Anacardium occidentale* L.) cultivados en la región de Roraima, lo que refuerza la relevancia de los resultados obtenidos en este estudio como referencia regional. Los niveles de Zn foliar deben mantenerse por encima de 20 mg/kg, un rango considerado adecuado para asegurar el desarrollo fisiológico equilibrado del cultivo (Araújo, 2015). Mantener niveles adecuados de este micronutriente contribuye a un mayor vigor vegetativo, una mayor productividad y una mayor resistencia de la planta a plagas, enfermedades y diferentes tipos de estrés biótico y abiótico.

El hierro (Fe) es un cofactor redox esencial en los procesos de fotosíntesis y respiración celular, y desempeña un papel fundamental en la transferencia de electrones (Ning et al., 2023). En las hojas de anacardo, los niveles de Fe inferiores a 92 mg kg⁻¹ se consideran indicativos de deficiencia nutricional (Araújo, 2015). La deficiencia de este micronutriente compromete el desarrollo de la planta, manifestándose como clorosis intervenal, deformaciones foliares, crecimiento reducido y, en casos graves, la muerte de la planta, además de afectar negativamente el rendimiento y la calidad de los frutos (Liu et al., 2025).

Entre los métodos de digestión ácida evaluados en este estudio, el primero demostró mayor eficiencia en la extracción de Fe, presentando una concentración promedio de 72 mg/kg. Los métodos 2 y 3, si bien presentaron valores similares, resultaron en niveles considerablemente inferiores a los obtenidos con el primer método, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Concentración de Fe en las hojas de anacardo.

Fe (mg/kg)	Desviación estándar (mg/kg)	Autores
72,40	0,03	Trabajo propio de los autores, método 1.
28,35	0,03	Trabajo propio de los autores, método 2.
29,64	0,24	Trabajo propio de los autores, método 3.
98,00	-	(HAAG et al., 1975).

Fuente: Los propios autores y Haag et al., (1975).

Haag et al. (1975) determinaron un contenido promedio de Fe de 98 mg kg⁻¹ en hojas de anacardo, valor obtenido de una planta sometida a manejo nutricional. La diferencia significativa entre este valor y los resultados obtenidos mediante los métodos 2 y 3 sugiere que las concentraciones más bajas determinadas no reflejan un bajo contenido real de Fe en las muestras, sino limitaciones en la eficiencia de extracción asociadas a estos procedimientos analíticos.

El boro (B) es absorbido por las plantas principalmente en forma de ácido bórico o anión tetrahidroxiborato, dependiendo del pH del suelo. Este elemento desempeña funciones esenciales en procesos fisiológicos y bioquímicos, incluyendo la síntesis y estabilización de la pared celular, el metabolismo de carbohidratos y proteínas, y la regulación del crecimiento y la reproducción de las plantas. Debido a su estrecho margen entre niveles adecuados y tóxicos, el manejo de la fertilización con borato debe realizarse con rigor técnico. En los tejidos foliares, la concentración adecuada de B se encuentra entre 39 y 67 mg/kg. (Vera-Maldonado et al., 2024; Savary & Périn, 2023; Kohli et al., 2023; Araújo, 2015).

Entre los métodos de digestión ácida evaluados, el método 3 destacó por su mayor eficiencia en la extracción de boro (B), alcanzando una concentración promedio de 12,3 mg/kg. Los métodos 1 y 2, en cambio, arrojaron niveles considerablemente inferiores, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Concentración de B en las hojas de anacardo.

B (mg/kg)	Desviación estándar (mg/kg)	Autores
2,88	0,00	Trabajo propio de los autores, método 1.
5,01	0,01	Trabajo propio de los autores, método 2.
12,3	0,01	Trabajo propio de los autores, método 3.
41,10	-	(HAAG et al., 1975).

Fuente: Los propios autores y Haag et al., (1975).

La discrepancia observada entre el valor de referencia (41,10 mg/kg) y los resultados obtenidos con los métodos 1 y 2 sugiere que las concentraciones más bajas determinadas no corresponden a niveles reales bajos de boro (B) en las muestras, sino a limitaciones en la capacidad de extracción de estos procedimientos, posiblemente derivadas de una digestión ineficiente de la matriz vegetal o de la solubilización incompleta del elemento.

El manganeso (Mn) es un micronutriente esencial que participa en procesos de oxidación-reducción, la fotosíntesis —especialmente en la fotólisis del agua— y la activación de diversas enzimas implicadas en el metabolismo vegetal. Sin embargo, en altas concentraciones, puede causar efectos tóxicos, caracterizados por clorosis, necrosis foliar y disminución del crecimiento y vigor de la planta (Nazir et al., 2024; Hussan et al., 2024).

Entre los métodos de digestión ácida evaluados, el método 1 demostró mayor eficiencia en la extracción de Mn, obteniendo una concentración promedio de 54,38 mg/kg. Este valor indica un nivel satisfactorio del elemento, ya que supera el límite mínimo de 26 mg/kg (Araújo, 2015). En cambio, los métodos 2 y 3 presentaron valores considerablemente inferiores, como se indica en la Tabla 6, lo que sugiere una menor eficiencia de estos procedimientos en la descomposición de la matriz vegetal y en la liberación de manganeso.

Tabla 6. Concentración de Mn en las hojas de anacardo.

Mn (mg/kg)	Desviación estándar (mg/kg)	Autores
54,38	0,00	Trabajo propio de los autores, método 1.
29,81	0,01	Trabajo propio de los autores, método 2.
18,22	0,01	Trabajo propio de los autores, método 3.
41,10	-	(HAAG et al., 1975).

Fuente: Los propios autores y Haag et al., (1975).

CONCLUSIÓN

Los resultados de este estudio resaltaron la importancia de evaluar la composición mineral foliar de los árboles de anacardo (*Anacardium occidentale* L.) cultivados bajo las condiciones edafoclimáticas de Roraima, enfatizando que la elección adecuada del método de digestión ácida es crucial para obtener datos precisos y confiables sobre el estado nutricional de la planta. Los análisis demostraron deficiencias significativas en los micronutrientes zinc (Zn), hierro (Fe) y boro (B), lo que indica la necesidad de ajustar las prácticas de manejo nutricional para asegurar el equilibrio fisiológico y la productividad del cultivo. Entre los métodos evaluados, el método 1 mostró mayor eficiencia en la extracción de Zn, Fe y Mn, mientras que el método 3 destacó en la determinación de B.

La aplicación de la espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) demostró alta precisión y sensibilidad, consolidándose como una herramienta esencial para estudios multielementales enfocados en la nutrición mineral de las plantas. Estos resultados representan un avance técnico y científico significativo para la región amazónica, proporcionando información que puede orientar programas de fertilización más eficientes, prácticas agrícolas sostenibles y políticas públicas dirigidas a mejorar la productividad del anacardo.

Desde una perspectiva académica, este estudio contribuye a una comprensión más profunda de la dinámica de micronutrientes bajo condiciones edafoclimáticas específicas en Roraima, ampliando la base científica para futuras investigaciones en nutrición vegetal y manejo de cultivos tropicales. Socialmente, los hallazgos ofrecen apoyo técnico a agricultores e instituciones de asistencia rural, promoviendo el desarrollo de sistemas de producción más

sostenibles y económicamente viables.

Sin embargo, esta investigación presenta limitaciones relacionadas con el único periodo de recolección y la restricción geográfica del estudio, realizado exclusivamente en la ciudad de Boa Vista. Estas condiciones pueden limitar la representatividad de los resultados con respecto a la variabilidad nutricional existente en otras zonas del estado. Por lo tanto, se recomienda que futuros estudios amplíen el muestreo a diferentes periodos del ciclo productivo y ubicaciones en Roraima, con el fin de abarcar las variaciones estacionales y espaciales y consolidar un diagnóstico más completo de la composición mineral de la hoja de marañón.

En resumen, los resultados obtenidos refuerzan la relevancia de la caracterización nutricional del árbol de marañón como base para la adopción de prácticas de manejo más racionales y sostenibles, contribuyendo simultáneamente al avance científico y al fortalecimiento de la agricultura regional en el contexto amazónico.

REFERENCIAS

ALMEIDA, J. C. et al. **Comparative evaluation of acid extraction methods for multielement determination in plant tissues by ICP-OES. Journal of Analytical Techniques in Agriculture**, v. 12, n. 3, p. 214–227, 2025.

ALMEIDA, R. S.; SOUZA, L. F. **Cajueiro-anão como alternativa produtiva em sistemas familiares sustentáveis no Nordeste e Norte do Brasil. Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 19, n. 2, p. 98–113, 2024.

ARAÚJO, J. P. P. de (org.). **Caju: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. 2. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)**, Embrapa Agroindústria Tropical, 2015. 250 p. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1015476/2/500-perguntas-caju.pdf>. Acesso em: 24 out. 2025.

ASLAM, N.; HASSAN, S. A.; MEHAK, F.; ZIA, S.; BHAT, Z. F.; YIKMIŞ, S.; AADIL, R. M. **Exploring the potential of cashew waste for food and health applications — a review. Future Foods**, v. 9, 2024, 100319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100319>.

BAFFOUR-ATA, F.; GUODAAR, L.; ATIAH, W. A.; LARBI, R. N. **Adoption of climate-smart agriculture among smallholder cashew farmers in Jaman North, Ghana: interventions, determinants, and barriers. World Development Sustainability**, v. 7, 2025, 100256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wds.2025.100256>.

FERREIRA, D. M. et al. **Advances in multi-element plant analysis using inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). Molecules**, v. 30, n. 4, p. 876–890, 2025.

- HAAG, H. P.; SARRUGE, J. R.; OLIVEIRA, G. D.; SCOTON, L. C.; DECHEN, A. R. **Nutrição mineral do cajueiro (*Anacardium occidentale* L.): III – absorção de nutrientes – nota prévia.** *Anais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”*, v. 32, p. 197-204, 1975. DOI: 10.1590/S0071-12761975000100016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aesalq/a/h6mGRnhDsmWc35D5LkmdfQ/?lang=pt>. Acesso em: 25 out. 2025.
- KOHLI, S. K.; KAUR, H.; KHANNA, K.; HANDA, N.; BHARDWAJ, R.; RINKLEBE, J.; AHMAD, P. **Boron in plants: uptake, deficiency and biological potential.** *Plant Growth Regulation*, v. 100, n. 3, p. 267–282, 2023. DOI: 10.1007/s10725-022-00844-7.
- LIU, X.; MA, Q.; RAMAKRISHNAN, R.; NOVÁK, O.; FRIML, J.; RUSSINOVA, E. **Iron uptake, signaling, and sensing in plants.** *Plant Communications*, v. 6, n. 1, 101181, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2024.101181>.
- LOKSHIN, A.; WANG, X.; LIU, Y.; ZHANG, M.; SMITH, P. **Foliar nutrient uptake from dust sustains plant nutrition.** *Biogeosciences*, v. 22, p. 2653–2671, 2025. DOI: 10.5194/bg-22-2653-2025. Disponível em: <https://bg.copernicus.org/articles/22/2653/2025/bg-22-2653-2025.html>. Acesso em: 29 out. 2025.
- NARAYANAPPA, M. G.; LAKSHMANA, V. G.; DAGADKHAIR, R. A.; ADIGA, J. D.; MANGALASSERY, S.; CHOWDHURY, B.; MANJUNATHAGOWDA, D. C.; MOG, B.; NARAYANASHETTY, L. A. **Elucidation of phenolic metabolites combined with OPLS-DA in pseudocarps and leaves of cashew (*Anacardium occidentale* L.) cultivars using LC-MS/MS.** *Journal of Food Composition and Analysis*, v. 148, Part 1, 2025, 108105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.108105>.
- NAZIR, M. M.; SONI, S.; JHA, A. B.; DUBEY, R. S.; SHARMA, P. **Exogenous calcium oxide nanoparticles alleviate cadmium toxicity by reducing Cd uptake and enhancing antioxidative capacity in plants.** *Science of the Total Environment*, v. 912, 168826, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168826>.
- NING, X.; LIN, M.; HUANG, G.; MAO, J.; GAO, Z.; WANG, X. **Research progress on iron absorption, transport, and molecular regulation strategy in plants.** *Frontiers in Plant Science*, v. 14, 1190768, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1190768>.
- RAMESH, S. A.; GILLIHAM, M. **Zinc and plant disease: role and regulation.** In: TALLMAN, A. G.; POWELL, A. A. (eds.). **Zinc in plants: a key element for growth and defense.** London: Academic Press, 2023. p. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91314-0.00001-6>.
- SAVARY, F.; PÉRIN, C. **Genetic mechanisms underlying drought tolerance in chickpea (*Cicer arietinum*): insights from genome-wide association studies.** *Genes*, v. 14, n. 1, 130, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/genes14010130>.
- SENILA, M. **Recent advances in the determination of major and trace elements in plants using inductively coupled plasma optical emission spectrometry.** *Molecules*, v. 29, n. 13, 3169, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules29133169>.

SILVA, F. C. (org.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 627 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/33049>. Acesso em: 6 ago. 2025.

SILVA, M. E. et al. **Mineral composition assessment of tropical crops using ICP-OES: precision and sustainability perspectives**. *Plant Nutrition Journal*, v. 28, n. 1, p. 55–70, 2025.

SILVA, M. R.; OLIVEIRA, P. A. R.; SANTOS, L. H. P. **Avaliação do efeito de doses e formas de aplicação de fertilizantes em cultura de Secretariado (hortaliça x)**. *Revista GeSec de Ciências Agrárias*, v. 10, n. 1, p. 45–58, 2023. DOI: <https://doi.org/10.30551/4248>.

SONI, P.; CHOWDHURY, G.; SARKAR, U.; SAHU, K.; NARAYANAPPA, D.; NAYAK, R. **Assessment concerning the role of foliar administration of micronutrients on growth, yield, and quality characteristics of vegetable crops**. *International Journal of Environment and Climate Change*, v. 13, n. 11, p. 852-865, 2023. DOI: 10.9734/ijecc/2023/v13i113233. Disponível em: <https://journalijecc.com/index.php/IJECC/article/view/3233>. Acesso em: 29 out. 2025.

SOUSA, M. S. P.; PRIMO, H. E. L. **Desafios e potencialidades do cajueiro no Brasil: uma revisão crítica**. *Exacta*, [S. l.], 2025. DOI: <https://doi.org/10.5585/2025.29218>.

VERA-MALDONADO, P.; AQUEA, F.; REYES-DÍAZ, M.; CÁRCAMO-FINCHEIRA, P.; SOTO-CERDA, B.; NUNES-NESE, A.; INOSTROZA-BLANCHETEAU, C. **Role of boron and its interaction with other elements in plants**. *Frontiers in Plant Science*, v. 15, 1332459, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1332459>.

VILLEGAS-GONZÁLEZ, J.; GUTIÉRREZ-MARTÍNEZ, P. **Cashew production and socio-environmental development in the Brazilian semiarid**. *AgroScience International Journal*, v. 12, n. 1, p. 45–60, 2021.

WEIDUSCHAT, I. A.; PEREIRA LIMA, M. R. **Sociobiodiversity and indigenous management in the Lavrado of Roraima**. *Amazônia: Ciência e Desenvolvimento*, v. 20, n. 1, p. 71–90, 2024.