



ISSN 2215-2202

AGRONOMÍA COSTARRICENSE

REVISTA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost>*Artículo científico***Avances en la nutrición mineral y calidad de la pimienta negra de Costa Rica***Paola Vargas-Barrantes^{1/**}, Michael González-Arce², Óscar Castro-Zúñiga³, Maricruz Ramírez-Sánchez⁴, Graciela Artavia-González⁵, Gabriel Garbanzo⁶^{*}Proyecto financiado por la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica bajo el proyecto VI-C0-248 y la Vicerrectoría de Acción Social de la Universidad de Costa Rica en el proyecto ED-3604.^{**}Autora para correspondencia. Correo electrónico: paola.vargasbarrantes@ucr.ac.cr¹Universidad de Costa Rica, Centro Investigaciones Agronómicas, Laboratorio de Microbiología Agrícola, San José, Costa Rica. ²Instituto del Café de Costa Rica, Unidad de Investigación, Coordinador Programa Nutrición Mineral, Barva de Heredia, Costa Rica. ³Universidad de Costa Rica, Centro Investigaciones en Protección de Cultivos, Laboratorio de Fitopatología, San José, Costa Rica. ⁴Universidad de Costa Rica, Centro Investigaciones Agronómicas, Laboratorio de Tecnología Poscosecha, San José, Costa Rica. ⁵Universidad de Costa Rica, Centro Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Laboratorio Químico, San José, Costa Rica. ⁶Universidad de Costa Rica, Centro Investigaciones Agronómicas, Laboratorio de Suelos y Foliare, San José, Costa Rica. DOI: <https://doi.org/10.15517/ad5kjz48>

Recibido el 19 de febrero del 2026; Aceptado el 22 de junio del 2026

Resumen

Introducción. La pimienta negra (*Piper nigrum* L.) es la especia de mayor consumo a nivel mundial. A pesar del alto potencial productivo y la calidad de los materiales cultivados en Costa Rica, existe información limitada sobre los requerimientos nutricionales del cultivo. **Objetivo.** Cuantificar los requerimientos y la absorción de nutrientes en plantas de pimienta para evaluar el rendimiento del cultivo y el contenido de piperina. **Materiales y métodos.** El estudio se realizó en un suelo Typic Dystrudepts en Río Cuarto de Alajuela, con una densidad de siembra de 1600 plantas ha⁻¹. Se efectuó un muestreo destructivo de plantas sanas y productivas para determinar biomasa, concentración de nutrimentos y contenido de piperina. La absorción de nutrientes se ajustó mediante un modelo determinístico basado en la estimación de hiperparámetros. **Resultados.** La distribución de biomasa varió según el estado fenológico. En plantas de un año predominó en hojas (49%), mientras que en plantas de dos años se concentró en frutos (38%) y en plantas de cuatro años en tallos (43%) y frutos (38%). Los macronutrientes se acumularon en el orden N > K > Ca > Mg > P y los micronutrientes en el orden Mn > Fe > Zn > B > Cu > Mo. El contenido promedio de piperina fue de 4,6%. Los requerimientos estimados de fertilización fueron 248 kg ha⁻¹ de N, 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 201 kg ha⁻¹ de K₂O, 28 kg ha⁻¹ de MgO, 82 kg ha⁻¹ de CaO, 0,6 kg ha⁻¹ de Zn y 0,4 kg ha⁻¹ de B.

Conclusión. El modelo de absorción de nutrientes presentó un alto ajuste y describió de forma confiable el comportamiento sigmoideal de la absorción durante el ciclo productivo, permitiendo estimar la absorción diaria de nutrimentos en el cultivo de pimienta en Costa Rica.

Palabras clave: *Piper nigrum*; piperina; modelo de absorción; manejo nutricional; crecimiento vegetal; requerimientos nutricionales.

Research article

Abstract

Advances in mineral nutrition and quality of black pepper in Costa Rica

Introduction. Black pepper (*Piper nigrum* L.) is the most widely consumed spice worldwide. Despite the high productive potential and the quality of the plant material cultivated in Costa Rica, information on the crop's nutritional requirements remains limited. **Objective.** To quantify nutrient requirements and nutrient uptake in Black pepper plants in order to evaluate crop performance and piperine content. **Materials and methods.** The study was conducted on a Typic Dystrudepts soil in Río Cuarto, Alajuela, Costa Rica, using a planting density of 1,600 plants ha⁻¹. Destructive sampling of healthy, productive plants was performed to determine biomass, nutrient concentrations, and piperine content. Nutrient uptake was fitted using a deterministic model based on hyperparameter estimation. **Results.** Biomass distribution varied according to the phenological stage. In one-year-old plants, biomass was mainly allocated to leaves (49%), whereas in two-year-old plants it was primarily concentrated in fruits (38%). In four-year-old plants, biomass was predominantly distributed between stems (43%) and fruits (38%). Macronutrient accumulation followed the order N > K > Ca > Mg > P, whereas micronutrient accumulation followed the order Mn > Fe > Zn > B > Cu > Mo. The average piperine content was 4.6%. Estimated fertilizer requirements were 248 kg ha⁻¹ N, 60 kg ha⁻¹ P₂O₅, 201 kg ha⁻¹ K₂O, 28 kg ha⁻¹ MgO, 82 kg ha⁻¹ CaO, 0.6 kg ha⁻¹ Zn, and 0.4 kg ha⁻¹ B. **Conclusion.** The nutrient uptake model showed a high goodness-of-fit and reliably described the sigmoidal pattern of nutrient uptake throughout the crop cycle, enabling the estimation of daily nutrient uptake in black pepper cultivation under Costa Rican conditions.

Keywords: *Piper nigrum*; piperine; uptake model; nutritional management; plant growth; nutritional requirements.

Introducción

La pimienta (*Piper nigrum*) pertenece a la familia Piperaceae y es originaria de los bosques occidentales de la India (Damanhoury & Ahmad, 2014; Sivaraman et al., 1999). Esta planta es utilizada en medicina, conservantes, perfumería y es la especie más utilizada en la cocina en el planeta (Carranza Patiño, 2012), debido a la piperina y sus isómeros que activan las papilas gustativas, potenciando el sabor, olor y un sabor picante en los alimentos (Govindarajan, 1977).

El cultivo de pimienta presenta una buena aclimatación en países tropicales. Este cultivo se desarrolla en elevaciones que van desde 0 hasta 1500 msnm, con un requerimiento de lluvia de entre los 2000-3000 mm anuales, así como de una alta humedad relativa y temperaturas entre los 23-32 °C con poca variación en la duración del día durante todo el año (Sivaraman et al., 1999; De Waard, 1969). No obstante, presenta poca tolerancia a temperaturas extremas, principalmente en etapas fenológicas de floración y maduración de frutos, lo cual reduce significativamente la productividad del cultivo (Sivaraman et al., 1999; Pillai et al., 1979).

A nivel mundial, este cultivo ocupó en el 2024 aproximadamente 857 754 ha, con una producción total de 933 416 t, concentrándose principalmente en Asia, que aporta cerca del 72% del volumen global, seguida por América y África (FAOSTAT, 2024). Vietnam y Brasil se consolidan como los principales productores, sustentados en sistemas productivos de gran escala y mediana productividad. En contraste, Costa Rica presenta una superficie cultivada reducida, cercana a las 665 ha distribuidas en pequeñas y medianas fincas, localizadas mayoritariamente en las provincias de Heredia y Alajuela (INEC, 2015). La pimienta costarricense destaca por su calidad, ya que puede alcanzar contenidos de piperina de hasta 7%, superando los valores promedio reportados para pimientas de otros países productores, que generalmente oscilan alrededor del 4-5%, una característica altamente valorada por la industria alimentaria y farmacéutica (Monge et al., 2013).

La productividad de la pimienta en Costa Rica depende, en gran medida, de la edad del cultivo y del manejo nutricional aplicado. En ese sentido, mediante una fertilización adecuada es posible alcanzar rendimientos de hasta 9,0 t ha⁻¹ año⁻¹ de fruto verde en plantaciones adultas (Quintero Guagua, 2010). En las condiciones comerciales de Costa Rica, los rendimientos oscilan entre 1,6 y 2,0 t ha⁻¹ año⁻¹ de fruta seca en plantaciones jóvenes, pudiendo alcanzar hasta 4,0 t ha⁻¹ año⁻¹ bajo un manejo agronómico adecuado (MAG, 1991).

Los requerimientos nutricionales de la planta deben evaluarse considerando las condiciones agroecológicas en las que se desarrolla el cultivo (Dalazen et al., 2022; Hussain et al., 2017; Prabhakaran-Nair, 2011; Srinivasan et al., 2007; Sivaraman et al., 1999). Este componente resulta particularmente sensible, ya que la productividad de la pimienta no depende exclusivamente de la cantidad total de un nutriente presente en el suelo, sino de su biodisponibilidad (Nguyen et al., 2025; Prabhakaran-Nair, 2011).

Esta planta presenta un mejor crecimiento y desempeño productivo en suelos bien drenados, con altos contenidos de materia orgánica, ya que no tolera condiciones de anegamiento prolongado (Zu et al., 2012; Ravindran, 2005). En adición, el cultivo muestra preferencia por suelos con baja densidad aparente, lo que favorece el desarrollo radicular y la absorción de nutrientes; sin embargo, existen pocos estudios sistemáticos que analicen de manera específica la influencia de este parámetro físico del suelo en el cultivo (Ravindran, 2005).

Por otro lado, los requerimientos nutricionales de la planta también varían en función del estado fenológico, la variedad cultivada, la estación del año, el tipo de suelo y las prácticas de manejo agronómico implementadas, particularmente la fertilización y el manejo del suelo (Sivaraman et al., 1999). En este sentido, Dalazen et al. (2022) mencionan que la etapa donde se da una mayor extracción de nutrientes es en la fase reproductiva y los frutos son donde la mayoría de los nutrientes absorbidos se concentran (Paduit et al., 2018).

Los reportes en la literatura indican que el manejo nutricional de la pimienta debe basarse en una combinación racional de abonos orgánicos y fertilizantes inorgánicos para optimizar la eficiencia productiva del cultivo (Terrazas & Falla, 2004). En este contexto, el P y el K se destacan como los nutrientes minerales de mayor incidencia sobre el rendimiento (Nybe et al., 1989), mientras que en programas balanceados de fertilización se integran los elementos N, P, K, Mg y los micronutrientes (Fe, Zn, Mo, Mn, Cu, B) aplicados vía foliar han demostrado efectos positivos sobre el crecimiento y la productividad (Córdova Núñez, 2012).

En el caso del P, se recomienda su aplicación en una única dosis anual, en tanto que el N y el K requieren fraccionamiento en varias aplicaciones para maximizar el rendimiento del cultivo (Quintero Guagua, 2010). Bajo un esquema de manejo nutricional adecuado, los rendimientos aumentan progresivamente con la edad del cultivo, alcanzando valores elevados a partir del tercer año posterior a la siembra (Quintero Guagua, 2010; MAG, 1991) y varían considerablemente según las condiciones de cultivo.

Por ejemplo, Ann (2012) reportó para una plantación de 1,5 años una acumulación de 197,9 kg ha⁻¹ de N, 26,4 kg ha⁻¹ de P, 193,4 kg ha⁻¹ de K, 56,3 kg ha⁻¹ de Ca y 17,6 kg ha⁻¹ de Mg; mientras que Zúñiga Sánchez et al. (2025) registraron valores superiores de absorción para la mayoría de los macronutrientes, con 279,8 ± 7,9 kg ha⁻¹ de N, 4,9 ± 0,5 kg ha⁻¹ de P, 267,2 ± 7,6 kg ha⁻¹ de K, 296,2 ± 8,2 kg ha⁻¹ de Ca, 25,9 ± 1,5 kg ha⁻¹ de Mg y 5,6 ± 0,5 kg ha⁻¹ de S.

A pesar de la relevancia de estos estudios, no se reportó información detallada sobre la absorción de nutrientes en plantas de pimienta de dos y cuatro años. En este sentido, se evidencia la necesidad de desarrollar estudios de absorción de nutrientes que consideren periodos de evaluación más prolongados y la inclusión de diferentes estados fenológicos del cultivo.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo cuantificar los requerimientos y la acumulación de nutrientes en plantas de pimienta, con el fin de examinar el rendimiento del cultivo y el contenido de piperina. Este abordaje permitirá generar información de base a nivel nacional para el desarrollo de planes de manejo nutricional más precisos, ajustados a las necesidades y condiciones agroecológicas en el país.

Materiales y métodos

Descripción del sitio

La presente investigación se desarrolló en una finca de pimienta, ubicada en Santa Isabel, cantón de Río Cuarto, provincia de Alajuela, Costa Rica. El sitio se encuentra a una altitud de 163 m, ubicado en las coordenadas 10°27'33" N y 84°12'44" O. La finca fue manejada bajo un sistema de producción convencional, principalmente por pequeños agricultores, quienes utilizan predominantemente la variedad Balamkota, reconocida por su amplia adopción y adecuada adaptación a las condiciones agroclimáticas del país.

Según la clasificación de zonas de vida de Holdridge, la finca se localizó en la zona de bosque húmedo tropical (Kohlmann et al., 2007). La región presentó una precipitación media anual de 4000 mm, con un periodo relativamente seco, comprendido entre los meses de febrero-abril, y un máximo pluviométrico concentrado entre julio-agosto. La temperatura media anual varió entre 23 y 26 °C. Diciembre y enero presentaron las temperaturas más bajas y la mayor amplitud térmica, mientras que abril y mayo registraron las temperaturas más altas. La humedad relativa fue elevada a lo largo del año (mayor a 80%), con valores que fluctúan entre 81% - 95% (**Figura 1**).

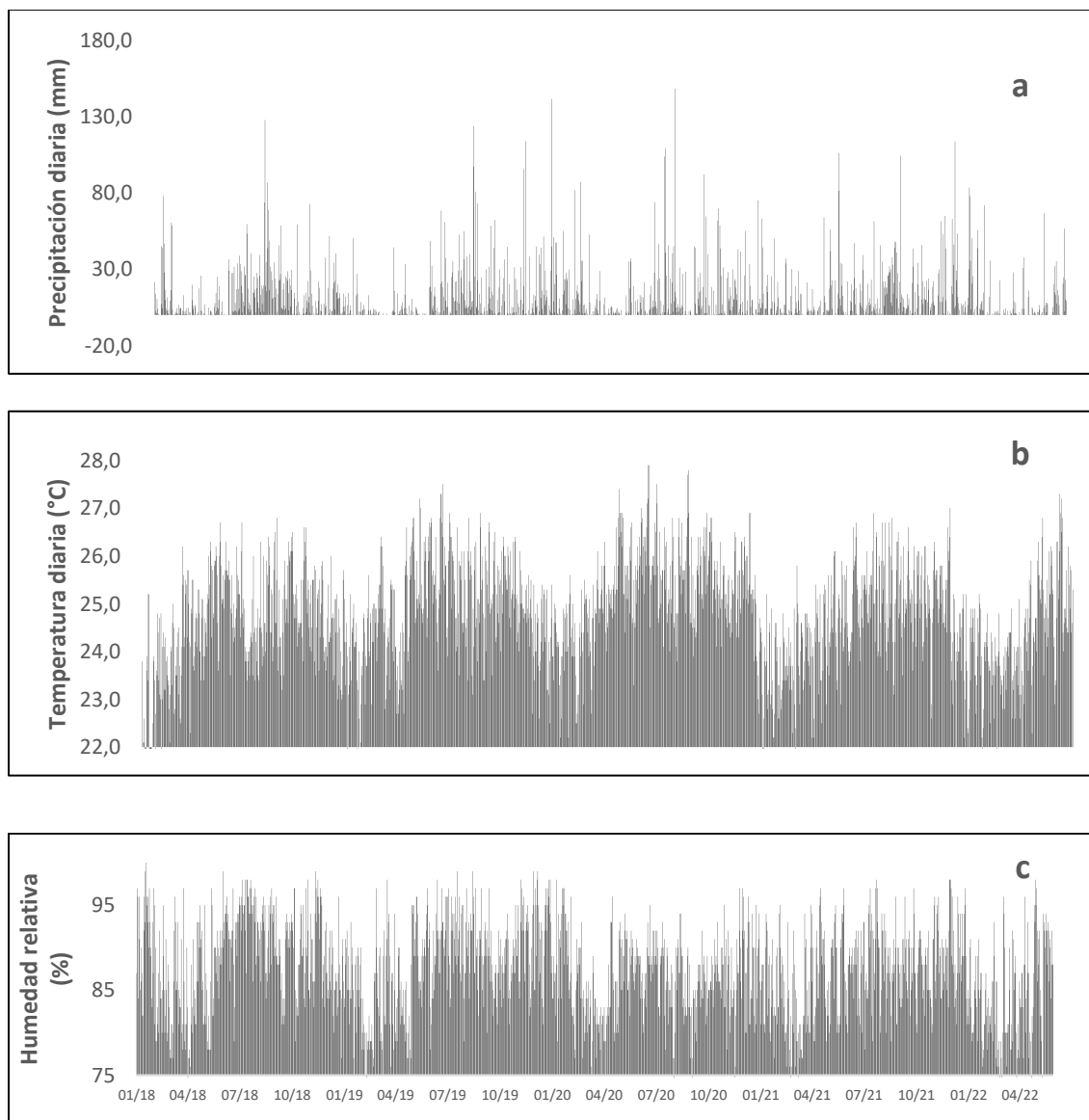


Figura 1. Condiciones ambientales en la zona de estudio, a) precipitación, b) temperatura diaria y c) humedad relativa. Periodo 2018-2022. Datos obtenidos de la base de datos del Instituto meteorológico Nacional.

Figure 1. Environmental conditions in the study area: (a) precipitation, (b) daily temperature, and (c) relative humidity. Period 2018–2022. Data obtained from the database of the National Meteorological Institute.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del suelo en el sitio de estudio.**Table 1.** Physicochemical soil properties at the study site.

	pH*	Acidez*	Ca	Mg	K	CICE	P	Zn	Cu	Fe	Mn	S	C	N	SA*
			cmol ₍₊₎ L ⁻¹					mg L ⁻¹						%	
NC †	5,5	0,5	4	1	0,2	5	10	3	1	10	5	-	-	-	-
Inceptisol	6,1	0,1	5,84	1,47	0,63	8,2	12	4,7	17	106	13	64	2,5	0,3	1,2

†NC; nivel crítico según Cabalceta y Molina (2006).

*pH: extraído en H₂O. Acidez: Acidez intercambiable. SA: Saturación de acidez.

Solución extractora KCl-Olsen modificado según Díaz Romeu y Hunter (1978), Briceño-Salazar y Pacheco Salazar (1984) y Bertsch et al. (1995).

Laboratorio de Suelos y Foliare del Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica.

Características del sitio de estudio

El sitio presentó un suelo clasificado como *Typic Dystrudepts* (Mata et al., 2022), con pendientes inferiores al 2% y sin evidencias de erosión superficial. El suelo presentó en el horizonte superficial contenidos de 57% de arcilla, 23% de arena y 20% de limo, correspondiente a una clase textural arcillosa, con coloraciones en húmedo de 7,5 YR 4/4, valores de densidad aparente de 1,1 Mg m⁻³, 2,4 Mg m⁻³ de densidad de partícula y un valor de conductividad hidráulica saturada de 6,7 cm h⁻¹. Los análisis químicos indicaron baja acidez intercambiable (0,10 cmol (+) L⁻¹), un valor de pH de 6,1 y concentraciones por encima del nivel crítico (Cabalceta & Molina, 2006) en Ca, Mg, K, P y Zn (**Tabla 1**). Los contenidos de C y N total fueron de 2,54% y 0,30% respectivamente, con una relación de C:N de 8,5.

El sitio de estudio presentó plantaciones de pimienta con diferentes edades de establecimiento, manejadas bajo un esquema agronómico uniforme, lo que permitió una producción escalonada del cultivo. El manejo agronómico fue homogéneo en toda la finca, aplicándose de manera uniforme las prácticas de control fitosanitario y manejo de arvenses. Las plantas de pimienta se establecieron utilizando tutores vivos de poró (*Erythrina* spp.), los cuales proporcionaron soporte estructural y sombra parcial según lo recomendado para el cultivo. El arreglo espacial del trasplante correspondió a un distanciamiento de 2,5 × 2,5 m entre plantas, dispuesto en hileras regulares.

Se aplicó un programa de fertilización base para plantaciones adultas equivalente a 150 kg ha⁻¹ de N, 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 70 kg ha⁻¹ de Mg, 30 kg ha⁻¹ de Zn y 5 kg ha⁻¹ de B, fraccionado en cuatro aplicaciones realizadas en los meses de enero, mayo, agosto y octubre. Las fuentes de fertilizantes utilizadas en la formulación incluyeron urea, fosfato diamónico (DAP), K-Mag, KCl, sulfato de zinc y ácido bórico.

Recolección y preparación de las muestras

Se seleccionaron plantas sanas, de crecimiento activo y de distintos estados fenológicos, con el fin de obtener información de las distintas concentraciones de nutrimentos en el ciclo del cultivo, según lo recomendado por Ann (2012). Para ello, se utilizaron los siguientes criterios de selección: plantas sin limitaciones de crecimiento y desarrollo fenológico, sin presencia de signos de enfermedades, sin síntomas de deficiencias nutricionales y con racimos completamente desarrollados. Se seleccionaron plantas con edades de cuatro meses, un año, dos años y cuatro años (**Figura 2**).

Debido a que el muestreo fue de carácter destructivo y considerando el valor económico que representa cada planta para el productor, se dispuso de no evaluar la planta de tercer año y una única muestra para cada edad evaluada. Las plantas extraídas fueron procesadas cuidadosamente con el fin de recuperar la mayor cantidad posible de material vegetal en condiciones adecuadas para su análisis. Cada parte de la planta fue lavada con agua desionizada y las hojas se limpiaron para remover restos de suelo y otras impurezas. Posteriormente, con el objetivo de estimar de manera más precisa la biomasa vegetal, cada individuo fue separado en los siguientes componentes: raíces, tallo tipo bejuco (tejido herbáceo), tallo leñoso (tejido lignificado), hojas, flores, frutos inmaduros y frutos cosechables. Una vez realizada la separación, se determinó la biomasa fresca de cada fracción de la planta.

Posteriormente, los tejidos fueron secados en un horno de circulación forzada durante 72 horas a 80 °C, hasta alcanzar peso constante, y se registró la biomasa seca correspondiente a cada componente. Debido a la limitada cantidad de material seco disponible, los análisis químicos se realizaron únicamente en las fracciones de raíces, tallos, hojas y frutos.

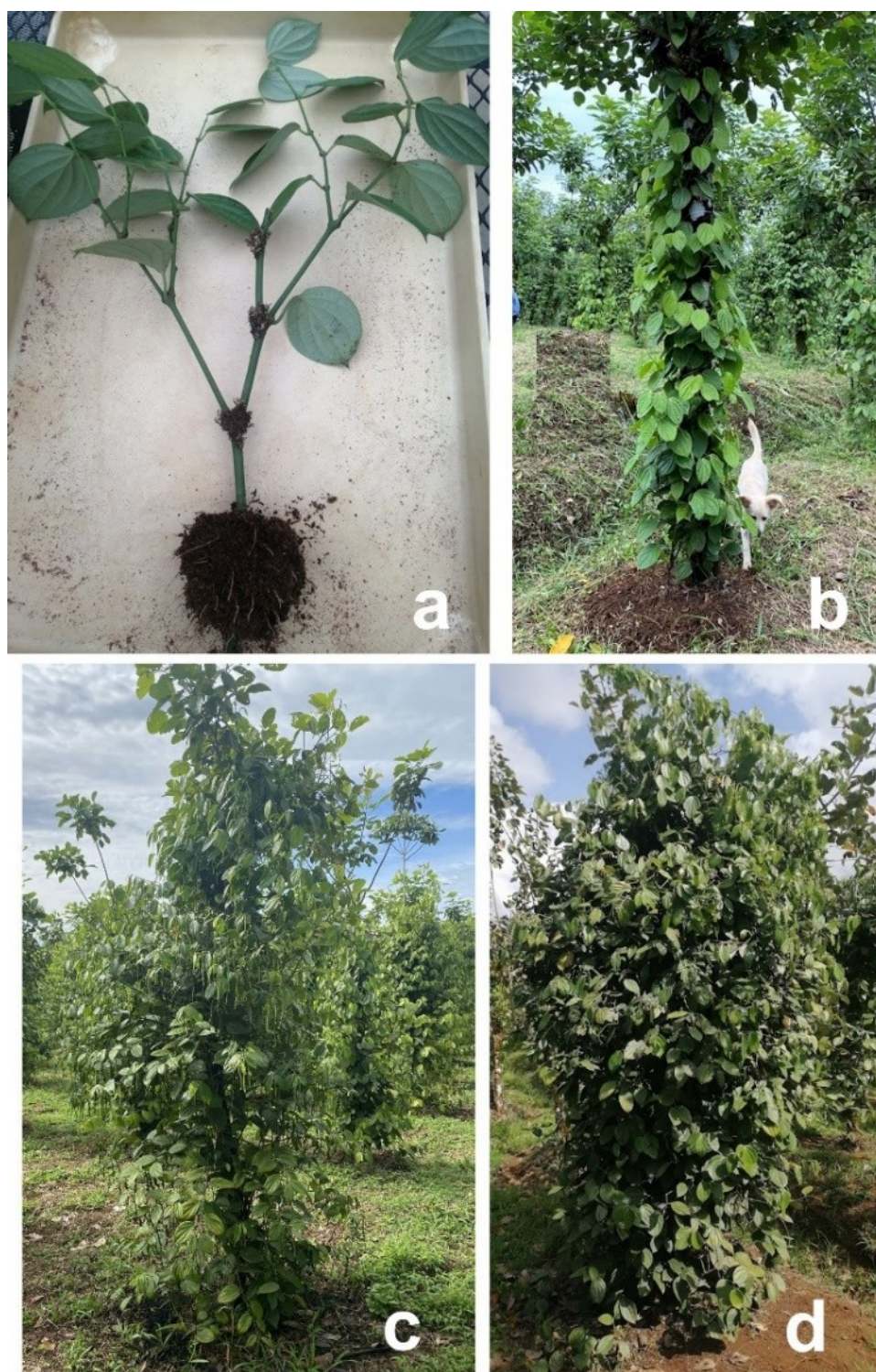


Figura 2. Plantas seleccionadas para análisis de biomasa, acumulación de nutrientes y contenidos de piperina. a) 0,25 años, b) 1 año, c) 2 años y d) 4 años. Río Cuarto, Alajuela.

Figure 2. Plants selected for biomass analysis, nutrient accumulation, and piperine content: (a) 0.25 years, (b) 1 year, (c) 2 years, and (d) 4 years. Río Cuarto, Alajuela.

Cuantificación analítica de nutrimentos y piperina

Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos y Foliares (LSF) del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), donde se determinó la concentración (%) de N, P, Ca, Mg, K, S, Fe, Cu, Zn, Mn y B. Para ello, las muestras fueron sometidas a un proceso de digestión húmeda, y las concentraciones de los elementos se cuantificaron mediante espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), según los principios analíticos de Kalra (1997) y Jones et al. (1991).

Para la determinación de piperina en fruto se homogenizaron 20 g de muestra hasta obtener un particulado menor a 500 μm (utilizando molino de ciclón Twister Retsch, Hann, Alemania). Se realizó la extracción de piperina a partir de 0,2500 g de muestra en 50,00 mL de etanol desnaturalizado (Número de catálogo 1.00980 Supelco, Millipore Sigma, Burlington, MA, USA), manteniendo un sistema de reflujo durante una hora. Seguidamente, el supernatante se filtró por gravedad cuantitativamente (Grado 2, Whatman®, GE Healthcare Life Sciences, Marlborough, MA, USA) y se llevó a 100 mL en balón aforado utilizando etanol. Se tomó una alícuota de 300 μL del extracto en un balón de 10 mL y se llevó a marca de aforo con etanol.

Para la cuantificación se midió a 343 nm en espectrofotómetro Ultravioleta Visible de doble haz (Pharmaspec UV-1700, Shimadzu, Kioto, Japón). El valor de absorbancia se interpoló en una curva de calibración lineal de estándar de piperina (mayor o igual a 97%, número de catálogo P49007 Sigma Aldrich, Millipore Sigma, Burlington, MA, USA) en el rango de (1,00 a 6,00) mg L^{-1} , a partir de estándar concentrado (0,100 g piperina en 100 mL de etanol). De forma similar, se siguió el análisis para las muestras de hojas, flores, tallos y raíces, con la única diferencia de que se pesó 1,00 g de muestra. Dichos análisis se realizaron en el laboratorio químico del Centro Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos (CITA) de la Universidad de Costa Rica (UCR).

Manejo de los datos

La dinámica temporal de la cantidad acumulada de nutrientes se modeló mediante una función logística, la cual describe procesos de crecimiento sigmoideal con una fase inicial lenta, una fase de incremento acelerado y una fase de saturación. Este modelo de absorción se ajustó según los delineamientos planteados por Garbanzo-León et al. (2024) para modelar la absorción de nutrimentos en otros cultivos de Costa Rica.

Este consistió en ajustar los parámetros de la ecuación 1:

$$Y(X) = Y_{ini} + \frac{Y_{max} - Y_{ini}}{1 + \exp(-aX + b)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- $Y(X)$ = es la absorción acumulada del nutriente en el tiempo X ,
- X = corresponde al tiempo expresado como días después del trasplante (DDT),
- Y_{ini} = es la absorción inicial del nutriente, definida como el valor observado en $X = \text{dia } 1$,
- Y_{max} = es la absorción máxima acumulada, definida como el valor observado en $X = \text{dia } 1460$,
- a = es el parámetro de pendiente, asociado a la velocidad de absorción,
- b = es el parámetro de desplazamiento temporal, asociado al inicio efectivo del proceso de absorción.

Los parámetros Y_{ini} y Y_{max} se fijaron a partir de observaciones experimentales con el fin de reducir la complejidad del modelo y evitar el sobreajuste, mientras que los parámetros a y b se estimaron mediante optimización numérica. Los ajustes logísticos provienen de los modelos ajustados por Hau (1993), Lipovetsky (2010) y Shabani et al. (2018), donde esta ecuación modela los parámetros en forma de “S”, ajustando la línea de crecimiento a los valores observados en campo.

1.1.1 Estimación de parámetros mediante optimización numérica

Los parámetros a y b se estimaron mediante un procedimiento de optimización numérica, cuyo objetivo fue minimizar la raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre los valores observados y los predichos por el modelo. La optimización se realizó utilizando el algoritmo *Limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno with Bounds* (L-BFGS-B), el cual permite la inclusión de restricciones en los parámetros y es adecuado para problemas no lineales con funciones suaves (Byrd et al., 1995) y ha sido ampliamente utilizado para la calibración de modelos en estudios hidrológicos y agronómicos (Garbanzo et al., 2025). Como función objetivo, se utilizó el RMSE, una medida ampliamente empleada para evaluar el ajuste, la precisión y la efectividad de modelos, debido a que cuantifica la magnitud promedio de los errores de predicción en las mismas unidades de la variable de respuesta (Willmott & Matsuura, 2005; Chai & Draxler, 2014).

La función objetivo se definió como:

$$\min_{a,b} RMSE(a,b) = f(a,b)$$

$$f(a,b) = \min_{L \leq a, b \leq B} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - Y_i^{\text{pred}})^2} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- $\min_{L \leq a, b \leq B}$ = La minimización está sujeta a restricciones de tipo caja utilizando el algoritmo “L-BFGS-B”
- n = es el número de observaciones,
- Y_i^{obs} = es el valor observado de absorción,
- Y_i^{pred} = es el valor estimado por el modelo logístico.

Este es un método cuasi-Newton diseñado para resolver problemas de optimización no lineal diferenciables con un número reducido de parámetros pre-modelados y sujeto a restricciones de tipo caja (box constraints). De esta manera, el algoritmo ajusta los parámetros dentro de estos límites. Este algoritmo aproxima la matriz Hessiana utilizando una cantidad limitada de información de gradientes, lo que reduce los requerimientos computacionales, ajusta con mayor precisión los parámetros y mejora la estabilidad numérica en comparación con métodos que calculan explícitamente la Hessiana (Byrd et al., 1995; Zhu et al., 1997).

Indicadores de ajuste y validación de los modelos de absorción

La calidad del ajuste del modelo se evaluó mediante múltiples indicadores estadísticos complementarios, debido a que ningún indicador estadístico describe por sí solo el desempeño y la precisión de un modelo. Así, la evaluación se realizó mediante un conjunto de métricas complementarias que permiten cuantificar tanto la magnitud del error de predicción como la capacidad del modelo para reproducir la variabilidad observada y la asociación entre los valores observados y estimados (Willmott, 1982; Legates & McCabe, 1999; Moriasi et al., 2007). Estos indicadores brindan una evaluación más robusta del ajuste del modelo para cada nutriente y facilitan la comparación de su desempeño entre estos.

Entre los indicadores se calcularon el error cuadrático medio (RMSE), error cuadrático medio normalizado (NRMSE), coeficiente de determinación (R^2) y coeficiente de correlación de Spearman (ρ) (Montgomery & Runger, 2011). Estos indicadores fueron calculados de la siguiente manera:

El RMSE cuantifica el error absoluto promedio entre los valores observados y los predichos; este se estima con la siguiente fórmula:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - Y_i^{\text{pred}})^2} \quad \text{Ecuación 3}$$

El RMSE asigna un mayor peso a los errores de mayor magnitud debido al término cuadrático presente en su formulación, por lo que resulta especialmente sensible a valores atípicos y constituye una de las métricas más utilizadas para evaluar modelos continuos (Chai & Draxler, 2014). Esta propiedad permite identificar modelos que presentan errores importantes en determinadas etapas del crecimiento y absorción del cultivo. La interpretación radica en que valores bajos indican un mejor ajuste del modelo a los datos observados.

Por otro lado, con el fin de comparar el desempeño del modelo entre nutrientes con diferentes magnitudes de absorción, se calculó el error cuadrático medio normalizado (NRMSE); este se cuantifica de la siguiente forma:

$$\text{NRMSE}(\%) = 100 \times \frac{\text{RMSE}}{Y_{\max} - Y_{\min}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde $Y_{\max}$ y $Y_{\min}$ corresponden a los valores máximo y mínimo observados. La normalización del RMSE permite expresar el error de predicción en términos relativos respecto al rango observado de la variable, lo que facilita la comparación del desempeño del modelo entre nutrientes cuyas magnitudes de absorción difieren considerablemente (Krause et al., 2005). Es decir, este indicador expresa el error relativo del modelo en términos porcentuales, entre menor sea este valor, mejor será la predicción.

El grado de concordancia entre los valores observados y los valores predichos se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2) y el coeficiente de correlación de Spearman (ρ). Este indicador es especialmente útil para evaluar la capacidad del modelo de reproducir el orden y la tendencia temporal de la absorción, independientemente de la escala absoluta.

El coeficiente de determinación cuantifica la proporción de la variabilidad observada que es explicada por el modelo lineal, proporcionando una medida del grado de ajuste (Montgomery & Runger, 2011); para este estudio se comparó entre los valores observados y estimados. No obstante, dado que el R^2 no refleja directamente la magnitud de los errores de predicción, su interpretación se complementó con las métricas de error descritas anteriormente.

Por su parte, el coeficiente de correlación de Spearman (ρ) evalúa la asociación monótona entre dos variables a partir de sus rangos, sin asumir relaciones estrictamente lineales ni normalidad en los datos. Esta característica lo hace particularmente útil para verificar si el modelo reproduce correctamente la secuencia temporal de absorción de nutrientes, aun cuando existan diferencias en la magnitud absoluta de las predicciones (Hollander et al., 2014). Todos estos cálculos fueron realizados y modelados con el software estadístico R (R Core Team, 2023).

Resultados y discusión

Análisis de crecimiento y producción

El ciclo de crecimiento de la planta de pimienta se inicia al momento del trasplante al campo. En esta etapa la planta presentó un peso fresco de 145 g, donde aproximadamente el 94% correspondió a contenido de agua. Para el primer año de establecimiento, la planta incrementó su biomasa en un aproximado de once veces, alcanzando un peso fresco cercano a 1,6 kg. En esta fase, la mayor proporción de la biomasa estuvo representada por las hojas (49%), seguidas por el tallo (36%) y la raíz (13%), mientras que una fracción considerablemente menor (2%) correspondió a flores y frutos incipientes (**Figuras 3 y 4**).

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Yap (2012) y Zúñiga Sánchez et al. (2025), quienes señalan que, en plantas de pimienta con aproximadamente 1,5 años, la biomasa se distribuye en hojas (34%), ramas (30%) y tallos (28%), con una menor proporción en raíces (8%).

En plantas de 2,5 años, la distribución de biomasa se modifica sustancialmente, destinándose una mayor fracción a la producción de frutos (34%), seguida por tallos (22%), hojas (20%), ramas (17%) y raíces (4%), reflejando el cambio en la asignación de recursos conforme avanza el desarrollo fenológico del cultivo.

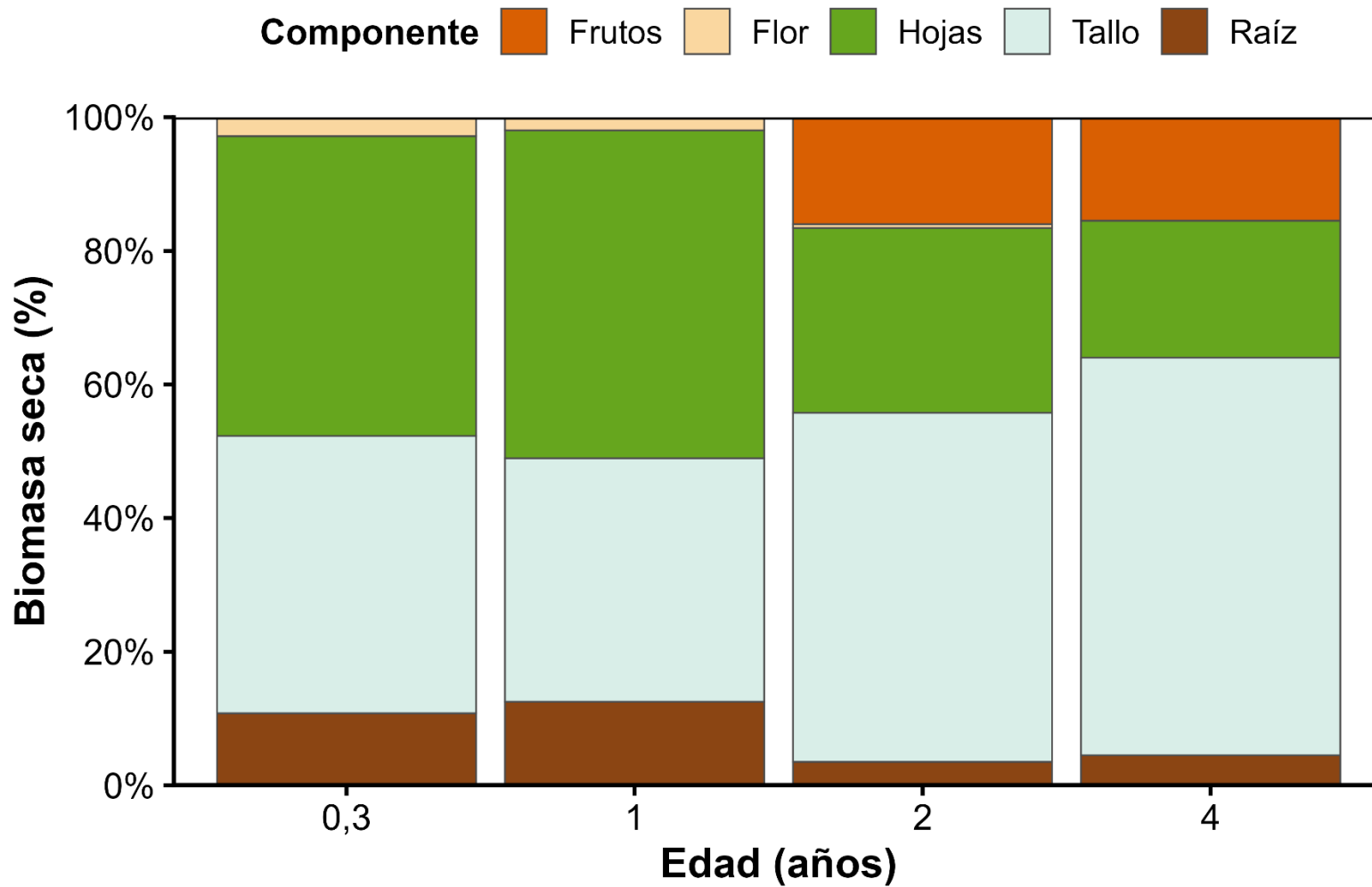


Figura 3. Distribución de la biomasa seca en plantas de pimienta en cuatro momentos del ciclo de cultivo. Río Cuarto, Alajuela. Marzo-julio 2022.

Figure 3. Distribution of dry biomass in black pepper plants at four stages of the growing cycle. Río Cuarto, Alajuela. March–July 2022.

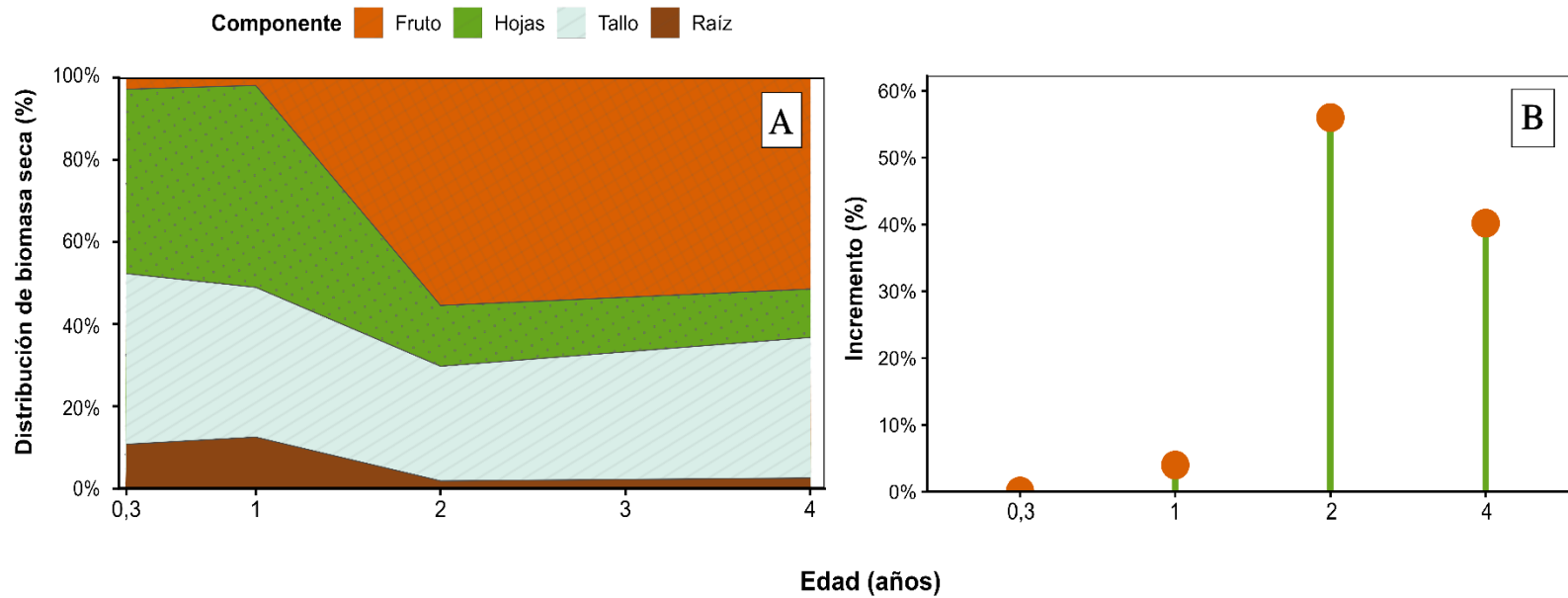


Figura 4. Proporción por componente (A) y su incremento de crecimiento (B) en cuatro momentos del ciclo de cultivo de pimienta, Río Cuarto, Alajuela. Marzo-julio 2022.

Figure 4. Proportion of biomass allocated to each component (A) and percentage increase in growth (B) at four stages of the black pepper growing cycle, Río Cuarto, Alajuela. March-July 2022.

El presente estudio evidenció una tendencia consistente con lo reportado por Yap (2012), quien, en plantas de pimienta con dos años de crecimiento, encontró que la biomasa se distribuyó principalmente en frutos (38%), seguida por ramas (23%), hojas (19%) y tallos (17%), mientras que la raíz representó únicamente el 3% del total. En esta etapa, el peso fresco por planta fue de 23,8 kg, lo que refleja una asignación creciente de biomasa hacia los órganos reproductivos conforme avanza el desarrollo del cultivo.

Por su parte, las plantas de cuatro años alcanzaron un peso fresco de 42,6 kg, con una distribución de biomasa dominada por los tallos (43%) y los frutos (38%). Dentro de la fracción de tallos, aproximadamente el 65% correspondió a ramas plagiotrópicas, mientras que el 35% restante estuvo conformado por tallos estructurales con mayor grado de lignificación. Las hojas representaron el 15% de la biomasa total y la raíz el 4%. Estos resultados son congruentes con los patrones de crecimiento descritos en estudios previos realizados en Malasia (De Waard & Sutton, 1960), la República Popular China (Guyang & Hongdun, 1997) y Brasil (Partelli, 2009), confirmando la consistencia de la dinámica de asignación de biomasa en el cultivo de pimienta bajo distintas condiciones de producción (Figuras 3 y 4).

Independientemente de la variedad, las condiciones edáficas, la estación climática y el manejo agronómico, el crecimiento de la pimienta se organiza en tres etapas fenológicas bien definidas: una fase temprana de desarrollo, que abarca aproximadamente los primeros 18 meses posteriores a la siembra; una fase de transición entre el desarrollo vegetativo y la madurez del fruto, comprendida entre los 18 y 26 meses; y una fase posterior a la cosecha, conocida como periodo de “recuperación”, que ocurre entre los 28 y 30 meses (Paduit et al., 2018).

Las mediciones realizadas indicaron que una planta en plena etapa productiva (plantas de 2 y 4 años) puede desarrollar hasta 1200 racimos por año. A partir de este total, se seleccionaron los racimos de mayor longitud ($11,3 \pm 0,4$ cm) y mayor peso (aproximadamente $11,8 \pm 0,6$ g) como base para proyectar la extracción total de nutrientes asociada a la cosecha de frutos, siguiendo criterios utilizados en estudios previos (Pillai et al., 1979; Guyang & Hongdun, 1997). Considerando que aproximadamente el 94% del peso del racimo corresponde a frutos y el 6% restante a la espiga, se estimó una producción promedio de 13,5 kg de frutos por planta, lo que equivale a un rendimiento de $21,6 \text{ t ha}^{-1}$, bajo una densidad de $1600 \text{ plantas ha}^{-1}$. Para las plantas específicamente evaluadas en este estudio, se determinó un índice de cosecha del 35%, lo que refleja una alta proporción de biomasa destinada a la producción comercial.

Contenidos de piperina

Los contenidos de piperina en las plantas analizadas se distribuyeron en concordancia al estudio de Pillai et al. (1979), debido a que la mayor concentración de piperina se encontró en los frutos (4,41%), seguida de la raíz (1,34%) y en menor proporción tallos leñosos (0,82%), hojas (0,52%) y tallos sarmentosos (0,18%) (**Tabla 2; Figura 5**). Sin embargo, las cantidades encontradas en este estudio son considerablemente menores en todos los tejidos en comparación a la concentración en frutos.

Los contenidos de piperina encontrados en los frutos coinciden con lo reportado por Radhakrishnan et al. (2002). Según Geisler y Gross (1990), las raíces y brotes nuevos tienen una contribución importante en la síntesis de piperina, lo que hace suponer que, al maximizar la producción de puntos de crecimiento en la planta, se aumentan los puntos de síntesis de piperina.

Tabla 2. Concentración de piperina en diferentes órganos de la planta de pimienta.

Table 2. Piperine concentration in different organs of the pepper plant.

Componente	Contenido de piperina (%)
Raíces	1,338
Tallo “Leñoso”	0,816
Tallo “Sarmentoso”	0,179
Hojas	0,519
Frutos de 2 años	5,72
Frutos de 4 años	3,64
Frutos, plantación comercial 1	4,13
Frutos, plantación comercial 2	4,32
Frutos, plantación comercial 3	4,26
Frutos, plantación comercial 4	4,4
Promedio en frutos	4,41

Las concentraciones de piperina en frutos de plantas de diferentes edades mostraron un incremento en frutos de plantas más jóvenes (2 años). No obstante, en plantas de 4 años los frutos mostraron concentraciones superiores al 3,6% (**Figura 5**). Concentraciones por arriba de 3,5 se consideran deseadas para productos de primera calidad, según las Normas Internacionales de los Alimentos (Comisión del Codex Alimentarius, 2026). Este estudio realizó un abordaje para explorar y comparar las concentraciones de piperina de cuatro plantaciones distintas, en las cuales se encontraron contenidos superiores a 4,13%, lo cual generó un promedio de 4,41% de contenido de piperina para este caso (**Tabla 2, Figura 5**).

Estos resultados sugieren la hipótesis de que la coexistencia de plantas de diferentes edades dentro de plantaciones comerciales podría representar una estrategia para combinar la mayor concentración de piperina observada en plantas jóvenes con la mayor productividad característica de plantas de mayor edad. Asimismo, la menor concentración de piperina observada en los frutos cosechables, en comparación con los frutos inmaduros, podría explicarse por un efecto de dilución asociado con el incremento de la biomasa durante el desarrollo del fruto. Bajo este escenario, la acumulación de materia seca sería proporcionalmente mayor que la síntesis de piperina, reduciendo su concentración en el tejido. No obstante, esta hipótesis deberá corroborarse mediante estudios que cuantifiquen simultáneamente la biomasa del fruto y el contenido total de piperina durante el proceso de maduración.

Análisis de los contenidos de macronutrientes

La acumulación de macronutrientes estimada en el presente estudio fue de forma general superior a la reportada en la literatura. No obstante, el patrón relativo de extracción de nutrientes concuerda con lo descrito por diversos autores para condiciones edafoclimáticas y sistemas de manejo distintos (**Tabla 3**). Estas diferencias en los valores absolutos pueden atribuirse, en parte, a que el análisis se realizó en una plantación con una densidad de 1600 plantas ha⁻¹, evaluando la acumulación de nutrientes hasta los cuatro años de crecimiento (48 meses), y bajo un nivel de productividad significativamente mayor al comúnmente documentado, con una producción promedio de 13,5 kg de fruto fresco por planta. En términos de magnitud, los macronutrientes que se acumularon en mayor proporción en la biomasa total de la planta siguieron el orden N > K > Ca > Mg > P, con una relación aproximada de 20:17:7:1,5:1, respectivamente. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Zúñiga Sánchez et al. (2025), Yap (2012), Azmil y Yau (1993), Sadanandan y Hamza (1993) y Veloso y Carvalho (1999), lo que refuerza la validez de los resultados obtenidos (**Tabla 3**).

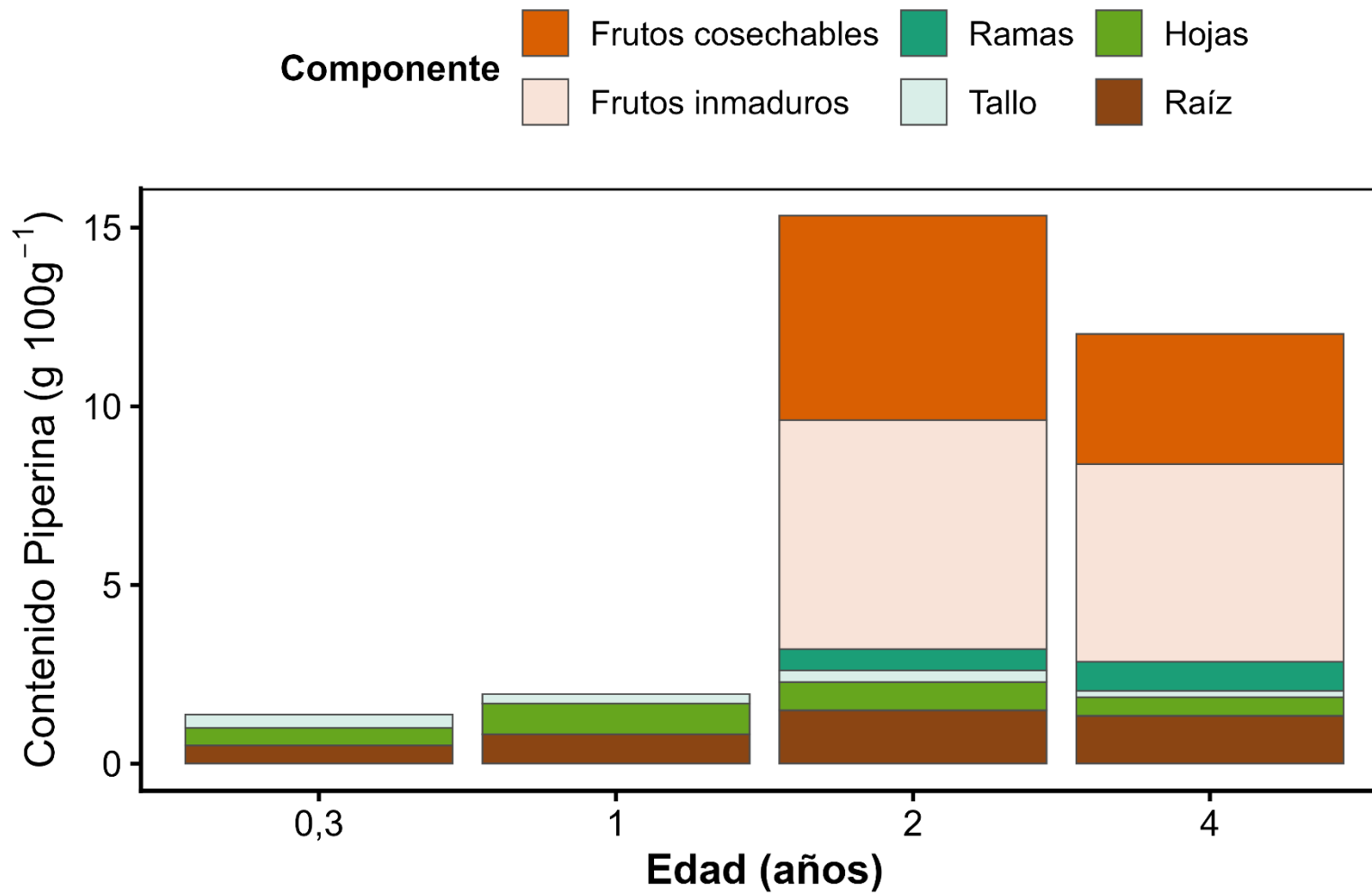


Figura 5. Distribución de los contenidos de piperina en diferentes componentes de la planta de pimienta, Río Cuarto, Alajuela. March–July 2022.

Figure 5. Distribution of piperine content among different plant components of black pepper in Río Cuarto, Alajuela, March–July 2022.

Table 3. Summary of available information on nutrient accumulation in pepper cultivation.

Table 3. Summary of available information on nutrient accumulation in pepper cultivation.

[illegible]

En el caso del N, se estimó una acumulación máxima de 385 kg ha^{-1} , confirmándose como el nutriente de mayor absorción por la planta (**Figura 6**). De este total, aproximadamente el 48% se acumuló en los frutos, el 29% en el tallo, el 20% en las hojas y únicamente el 3% en la raíz. Este patrón de distribución es consistente con lo reportado por Azmil y Yau (1993) y Yap (2012), quienes describen proporciones cercanas al 33% en frutos, 37% en tallos, 25% en hojas y 5% en raíces, lo que sugiere una asignación preferencial del nitrógeno hacia los órganos de mayor demanda metabólica y productiva.

En cuanto al P, estudios previos indican que más del 40% de este nutriente se concentra en los frutos (Zúñiga et al., 2025; Sadanandan & Hamza, 1993), comportamiento que coincide con los resultados obtenidos en el presente trabajo. En este estudio, se determinó que aproximadamente el 55% del P absorbido se acumuló en los frutos, lo que equivale a 11 kg ha^{-1} de P (**Figura 6**). Adicionalmente, Srinivasan et al. (2012) asociaron el crecimiento de los entrenudos y el incremento en el número de hojas con la disponibilidad de fósforo, mientras que Nybe et al. (1989) señalaron que el P y el K son los nutrientes con mayor impacto sobre el rendimiento del cultivo, destacando su relevancia en el manejo nutricional de la pimienta.

En el caso del K y Mg, ambos nutrientes mostraron un comportamiento de acumulación similar (**Figura 6**), concentrándose principalmente en los tallos (45%), seguidos por los frutos (30%), mientras que aproximadamente un 20% se acumuló en las hojas y solo un 5% en las raíces. Este patrón de distribución coincide con lo reportado por Veloso y Carvalho (1999), Azmil y Yau (1993) y Sadanandan y Hamza (1993). El K, además de su papel fundamental en el rendimiento del cultivo, ha sido asociado con mejoras en la calidad del grano, ya que se ha documentado que la aplicación de sulfato de potasio incrementa los contenidos de oleoresina y piperina en la pimienta negra (Srinivasan et al., 2012).

El Ca constituye uno de los nutrientes clave en el manejo nutricional de la pimienta, dado que en este estudio el cultivo acumuló aproximadamente 140 kg ha^{-1} , posicionándose como el tercer elemento de mayor acumulación en la planta. No obstante, debe considerarse su antagonismo con el K, Zn y Mg (Rodrigues-Dalazen et al., 2020), así como su baja movilidad dentro de la planta, lo que limita su translocación hacia los frutos, donde se acumuló únicamente alrededor del 14% del Ca total. En este sentido, Yap (2012) señala que más del 50% de los requerimientos de Ca del cultivo se concentran en las etapas iniciales del desarrollo del fruto, lo que resalta la importancia de una adecuada disponibilidad de este nutriente durante las fases tempranas del ciclo productivo.

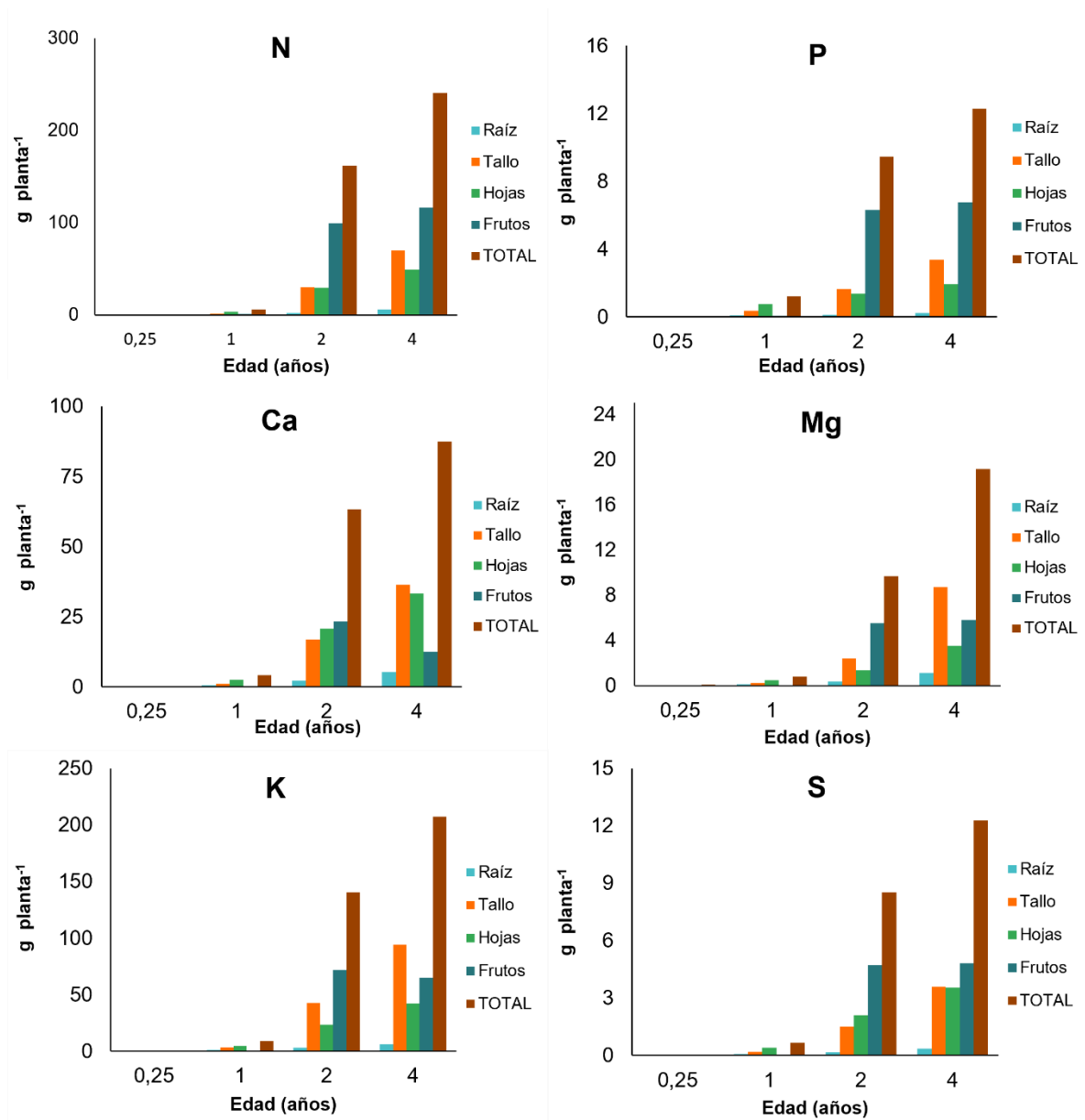


Figura 6. Acumulación de N, P, Ca, Mg, K y S en cuatro momentos del ciclo de cultivo de pimienta, Río Cuarto, Alajuela.

Figure 6. Accumulation of N, P, Ca, Mg, K, and S at four stages of the crop cycle of pepper, Río Cuarto, Alajuela.

Análisis de los contenidos de micronutrientes

Diversos estudios señalan que el Fe es el micronutriente que la planta de pimienta absorbe en mayor cantidad (Zúñiga Sánchez et al., 2025; Dalazen et al., 2022). Sin embargo, los resultados obtenidos en la presente investigación evidencian que el Mn fue el micronutriente predominante en los tejidos vegetales (**Figura 7**). Este comportamiento concuerda con lo reportado por Hamza y Sadanandan (2005), Srinivasan et al. (2007), Adzemi et al. (1993) y Sim (1971). Ambos elementos suelen encontrarse en alta disponibilidad en los suelos de Costa Rica (Bertsch, 1995), razón por la cual generalmente no se incluyen de forma rutinaria en los programas de fertilización de la mayoría de los cultivos.

En contraste, el Zn y el B, aunque se absorben en cantidades considerablemente menores que Fe y Mn (**Figura 7**), se consideran micronutrientes clave para el adecuado desarrollo reproductivo y el rendimiento del cultivo. Geetha y Nair (1990) reportaron una reducción del 48,4% en la caída de espigas mediante la aplicación de sulfato de zinc. Asimismo, estos autores señalaron que la aplicación conjunta de Zn, B y Mo, en combinación con una fertilización base de N, P y K, produjo incrementos significativos en el rendimiento, siendo la proporción 5:2:1 (Zn:B:Mo) la que mostró los mejores resultados.

Para el Mo, no se encontró información específica en la literatura sobre su absorción en el cultivo de pimienta. Es probable que se deba a las limitaciones analíticas asociadas a su cuantificación, dadas las bajas concentraciones en que se presenta en los tejidos vegetales. No obstante, en el presente estudio se estimó que una plantación adulta de cuatro años podría llegar a acumular cerca de 1 g ha⁻¹ de Mo (**Figura 7**), lo que resalta la importancia de considerar este micronutriente, aun cuando su demanda sea reducida. Hamza y Sadanandan (2005) documentaron incrementos de hasta un 20% en el rendimiento, así como una mejora en la calidad de los racimos, reflejada en aumentos significativos en los contenidos de oleorresina y piperina. Esto se encontró mediante el efecto de las aplicaciones de 0,5 a 1,0 kg de molibdato de amonio. Sin embargo, estos mismos autores señalaron reducciones significativas en el rendimiento cuando las concentraciones foliares de molibdeno superaron los 3 mg kg⁻¹, lo que evidencia un rango estrecho entre suficiencia y toxicidad.

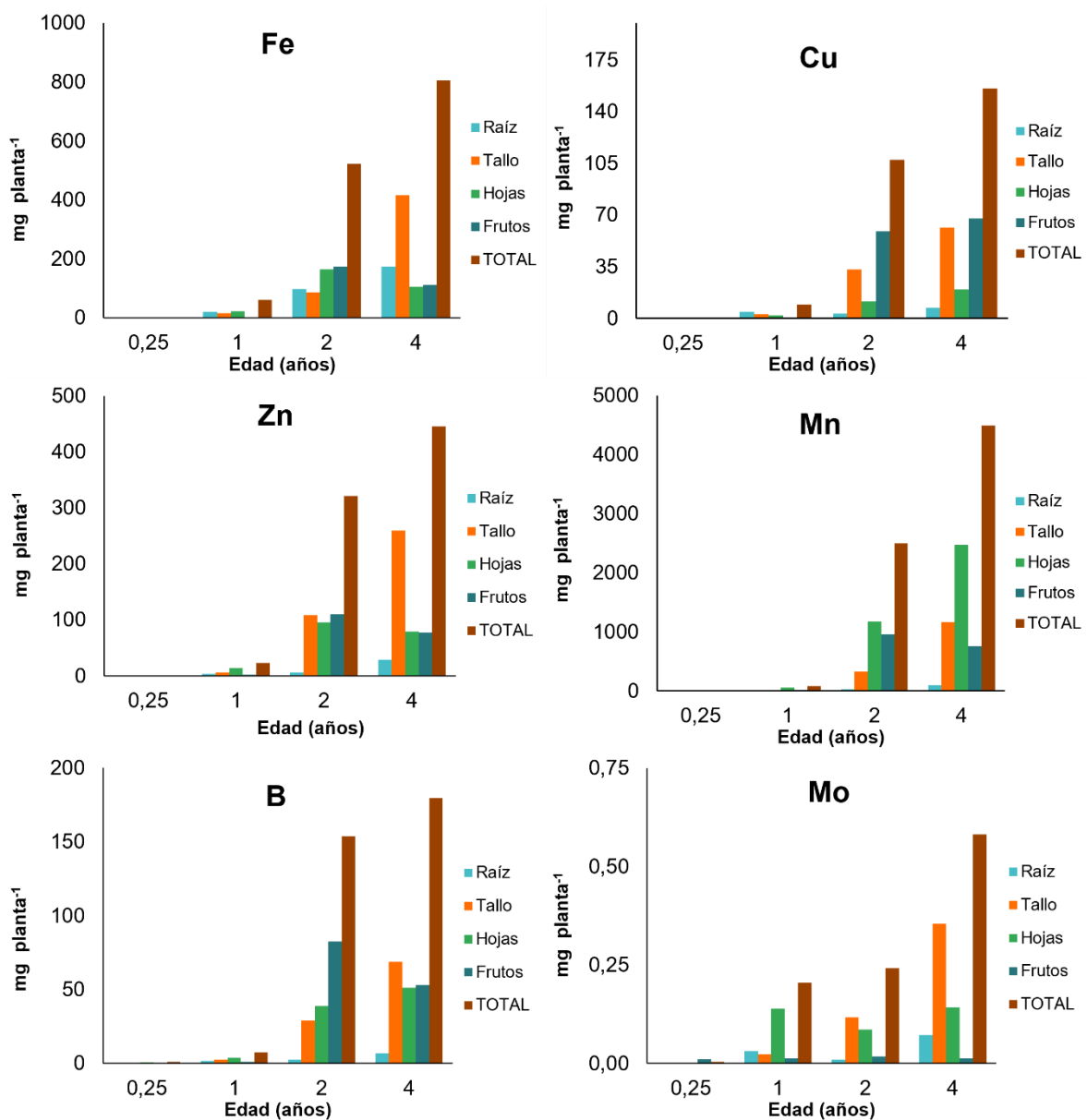


Figura 7. Acumulación de Fe, Cu, Zn, Mg, B y Mo en cuatro momentos del ciclo de cultivo de pimienta, Río Cuarto, Alajuela.

Figure 7. Accumulation of Fe, Cu, Zn, Mn, B, and Mo at four stages of the crop cycle of pepper, Río Cuarto, Alajuela.

Por su parte, Srinivasan et al. (2012) indicaron que la disponibilidad de Mo en el suelo incrementa con la incorporación de materia orgánica, debido a la formación de complejos que favorecen su absorción por las plantas. Asimismo, el encalado puede incrementar la disponibilidad de Mo como resultado del intercambio de los aniones MoO_4^{2-} y HMoO_4^- con los grupos OH^- de las arcillas (Srinivasan et al., 2012). En contraste, se ha reportado que la deficiencia de boro es más frecuente en suelos de textura gruesa, con bajos contenidos de materia orgánica y sometidos a regímenes de alta precipitación, condiciones que favorecen su lixiviación.

Modelado de absorción de nutrientes en el cultivo de pimienta

Este estudio permitió desarrollar una aproximación para la determinación del modelo de absorción de nutrientes en el cultivo de pimienta. El modelo demostró un alto nivel de ajuste, con coeficientes de determinación (R^2) entre 0,97 y 0,99 y coeficientes de correlación de Pearson (ρ) cercanos a 0,99 entre los valores observados y los valores predichos (**Tabla 4**). La magnitud de los errores obtenida para estos modelos fue baja. Particularmente, estos valores anteriormente mencionados para los macronutrientes fueron bajos en comparación con los micronutrientes, con valores de NRMSE que oscilaron entre 0,32 y 8,26. Los nutrientes que presentaron el menor grado de ajuste y los mayores errores de predicción fueron el hierro (Fe) y el manganeso (Mn), con valores de RMSE de 98,33 y 84,19 g ha⁻¹, respectivamente. El resto de los nutrimentos presentó un ajuste excelente, con errores de predicción bajos, tanto en macronutrimentos, cuyos valores oscilaron entre 0,12 y 1,40 kg ha⁻¹, como en micronutrimentos, con rangos entre 1,49 y 2,53 g ha⁻¹ (**Tabla 4**).

Los hiperparámetros estimados en este estudio mostraron una tendencia consistente con otros modelos previamente calibrados para condiciones de Costa Rica. El modelo de absorción de nutrientes propuesto por Garbanzo-León et al. (2024), originalmente calibrado para el cultivo de pitahaya, presentó un ajuste satisfactorio al aplicarse al cultivo de pimienta. Los valores estimados del parámetro a oscilaron entre 0,0069 y 0,0083, mientras que el parámetro b se ubicó entre 3,00 y 5,91. Estos rangos son comparables con los reportados para pitahaya, donde a varió entre 0,0042 y 0,0074, y b entre 3,68 y 5,81. Estos resultados respaldan la robustez del modelo de absorción de nutrientes para describir y predecir el comportamiento sigmoideal de la absorción de macro y micronutrimentos dentro de la ventana temporal definida para cada cultivo.

Tabla 4. Parámetros de absorción de nutrimentos, capacidad predictora y coeficiente de correlación entre los valores predichos y los valores observados para los modelos ajustados, en el cultivo de pimienta.

Table 4. Nutrient uptake parameters, model parameters, predictive performance, and correlation coefficients between predicted and observed values for the fitted models in black pepper cultivation.

Nutriente	Y _{ini}	Y _{max}	a	b	RMSE	NRMSE	R ²	rho
	kg ha ⁻¹		-	-	kg ha ⁻¹	%	-	-
N	0,01	261,2	0,008	5,91	1,4	0,54	0,99	0,99
P	0,001	13,1	0,008	5,77	0,54	4,15	0,99	0,99
Ca	0,048	133	0,0082	5,76	0,63	0,48	0,99	0,99
Mg	0,001	25,6	0,0069	5,8	0,23	0,89	0,99	0,99
K	0,01	269,6	0,0078	5,77	0,85	0,32	0,99	0,99
S	0,001	14,7	0,0079	5,79	0,12	0,85	0,99	0,99
	g ha ⁻¹		-	-	g	%	-	-
Fe	0,1	1190	0,0075	3	98,33	8,26	0,97	0,99
Cu	0,01	177	0,008	5,76	2,29	1,29	0,99	0,99
Zn	0,01	645	0,0083	5,75	2,53	0,39	0,99	0,99
Mn	0,1	6766,8	0,0074	5,78	84,19	1,24	0,99	0,99
B	0,03	247,9	0,0083	5,75	1,49	0,6	0,99	0,99

Y "ini" = es la absorción inicial del nutriente, definida como el valor observado en X= día 1.

Y "max" = es la absorción máxima acumulada, definida como el valor observado en X= día 1460.

a = es el parámetro de pendiente, asociado a la velocidad de absorción.

b = es el parámetro de desplazamiento temporal, asociado al inicio efectivo del proceso de absorción

Recomendaciones de fertilización para el cultivo de la pimienta

Los resultados obtenidos en el presente estudio indican que la fertilización de la pimienta debe ajustarse al estado fenológico del cultivo, ya que los requerimientos nutricionales varían significativamente entre las fases de establecimiento, crecimiento y producción (**Tabla 5**). Este estudio propone el ajuste de los programas de fertilización del cultivo de pimienta en función de tres requerimientos nutricionales diferenciados, de acuerdo con el estado fenológico de las plantas.

La fase de establecimiento (que comprende desde el trasplante hasta el primer año) presentó requerimientos nutricionales relativamente bajos, estimados como las siguientes magnitudes: 17 kg ha⁻¹ de N, 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 23 kg ha⁻¹ de K₂O, 3 kg ha⁻¹ de MgO, 13 kg ha⁻¹ de CaO, 0,1 kg ha⁻¹ de Zn y 0,1 kg ha⁻¹ de B (**Tabla 5**). Estas dosis relativamente bajas de nutrientes permiten favorecer el desarrollo inicial del sistema radical y la formación de la estructura vegetativa sin incurrir en aplicaciones excesivas de fertilizante.

Tabla 5. Recomendaciones de fuentes y dosis de fertilización para plantaciones de pimienta con alta productividad (22 t ha⁻¹) y una densidad de siembra de 1600 plantas·ha⁻¹.

Table 5. Doses and fertilization recommendations for high-yield black pepper plantations (22 t ha⁻¹) with a planting density of 1600 plants ha⁻¹.

Etapa del cultivo	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	Zn	B
	Dosis a aplicar (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)						
Establecimiento (Transplante-1 año)	17	30	23	3	13	0	0
Crecimiento (1 año – 2 año)	188	50	168	18	76	1	1
Producción (A partir del 2 año)	248	60	201	28	82	1	0

A partir del primer año, el incremento en las dosis de N, K₂O y CaO refleja la mayor demanda asociada al crecimiento vegetativo acelerado y a la formación de estructuras reproductivas. En esta etapa se recomienda fraccionar las aplicaciones, con el fin de mejorar la eficiencia en el uso de los nutrientes y reducir las pérdidas por lixiviación, particularmente en zonas de alta precipitación, como Río Cuarto, Alajuela.

En contraste, durante la fase productiva, a partir del segundo año de cultivo, las dosis recomendadas aumentan sustancialmente como consecuencia de la incorporación de los requerimientos asociados a la cosecha. Para esta etapa, las recomendaciones derivadas del presente estudio corresponden a 248 kg ha⁻¹ de N, 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 201 kg ha⁻¹ de K₂O, 28 kg ha⁻¹ de MgO, 82 kg ha⁻¹ de CaO, 0,6 kg ha⁻¹ de Zn y 0,4 kg ha⁻¹ de B.

Para plantaciones con una densidad aproximada de 1600 plantas ha⁻¹ y rendimientos cercanos a 22 t ha⁻¹, las dosis propuestas constituyen una primera aproximación como referencia técnica para el manejo nutricional del cultivo. No obstante, se recomienda ajustar las cantidades finales de fertilizante a las eficiencias de fertilización, con base en análisis de suelo y foliares, el historial de productividad y las condiciones locales de manejo. De esta manera, la fertilización responderá tanto a la demanda del cultivo como a las concentraciones de nutrimentos en el sitio.

Conclusiones

El presente estudio permitió cuantificar de manera integral la absorción y los requerimientos nutricionales del cultivo de pimienta, lo que generó información clave sobre la dinámica de acumulación de macro y micronutrientes en función de la edad fenológica de la planta de pimienta. Los resultados evidenciaron patrones consistentes de la absorción nutricional, con una clara priorización hacia los frutos y la calidad de la pimienta, lo cual explica la estrecha relación entre la nutrición mineral, el rendimiento y la alta calidad del grano, expresada en los contenidos superiores al 4,40% en piperina.

La aplicación del modelo de absorción nutrimental evidenció un alto nivel de ajuste y robustez, permitiendo describir de manera adecuada el comportamiento sigmoideal de la absorción de nutrientes a lo largo del ciclo productivo del cultivo. Este enfoque se consolidó como una herramienta confiable para estimar la demanda nutrimental en condiciones comerciales, ya que posibilita cuantificar la absorción de nutrimentos a escala diaria. No obstante, estos resultados constituyen únicamente la base teórica para la estimación de los requerimientos nutricionales, dado que la determinación de las dosis de fertilización debe considerar, de manera integrada, las condiciones químicas, físicas y microbiológicas del suelo, a fin de ajustar adecuadamente las cantidades de fertilizantes a aplicar. Con base en los resultados obtenidos en la presente investigación, la **Tabla 4** presenta una aproximación del plan de fertilización para alcanzar un rendimiento estimado de 22 t ha⁻¹, bajo una densidad de siembra de 1600 plantas ha⁻¹.

En conjunto, la información generada constituye una base científica sólida a nivel nacional para el diseño de planes de manejo nutricional más precisos y eficientes, ajustados a las condiciones agroecológicas de Río Cuarto de Alajuela. La implementación de estrategias de fertilización basadas en estos resultados tiene el potencial de mejorar el rendimiento del cultivo, optimizar la calidad del producto y aumentar la sostenibilidad de los sistemas productivos de pimienta, lo que tiene alto potencial para contribuir a la toma de decisiones más informadas y técnicamente fundamentadas para productores y técnicos de esta región.

Agradecimientos

Un especial agradecimiento a los señores Geovanny Carranza y Freddy Sánchez por permitir desarrollar el estudio en sus fincas, y a los señores Otoniel y Ricardo, por sus valiosos aportes en el campo. A los ingenieros agrónomos Luis Fernando Mora Rodríguez y Freddy Gamboa Quirós, por todo el apoyo mostrado al proyecto desde la Compañía Agrícola Industrial PROPICA, SA. A Gloriana Carmona Abellán y Paula Alfaro Fallas por su colaboración en los muestreos y el procesamiento de las muestras. Al personal del Instituto Meteorológico Nacional por compartir los datos meteorológicos. Al personal del Centro de Investigaciones Agronómicas y del Centro Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Universidad de Costa Rica por realizar todos los análisis de piperina.

Literatura citada

- Adzemi, M. A., Hamdan, J., & Sjahril, J. S. (1993). Macronutrient removal studies on black pepper (*Piper nigrum* L.) in Sarawak. En M. Y. Ibrahim, C. F. J. Bong, & I. P. Ipor (Eds.), *The pepper industry: Problems and prospects* (pp. 104-109). Universiti Pertanian Malaysia.
- Ann, Y. C. (2012). Determination of nutrient uptake characteristic of black pepper (*Piper nigrum* L.). *Journal of Agricultural Science and Technology B*, 2(10B), 1091-1099. <https://www.davidpublisher.com/Public/uploads/Contribute/55d3e0bd4c6a8.pdf>
- Azmil, A. R., & Yau, P. Y. (1993). Improvements in agronomic practices for pepper cultivation. En M. Y. Ibrahim, C. F. Bong, & I. B. Ipor (Eds.), *The pepper industry: Problems and prospects* (pp. 15-23). Universiti Pertanian Malaysia.
- Bertsch, F. (1995). *La fertilidad de los suelos y su manejo*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Briceño-Salazar, J. A., & Pacheco-Salazar, R. (1984). *Métodos analíticos para el estudio de suelos y plantas*. Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica.

- Byrd, R. H., Lu, P., Nocedal, J., & Zhu, C. (1995). A limited memory algorithm for bound constrained optimization. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 16(5), 1190-1208. <https://doi.org/10.1137/0916069>
- Cabalceta, G., & Molina, E. (2006). Niveles críticos de nutrimentos en suelos de Costa Rica utilizando la solución extractora Mehlich 3. *Agronomía Costarricense*, 30(2), 31-44. <https://doi.org/10.15517/rac.v30i2.6808>
- Carranza Patiño, R. D. (2012). *Efectos de distintas concentraciones hormonales en la inducción de raíces en estacas de pimienta negra (Piper nigrum L.)* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. Repositorio Institucional de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo. <https://repositorio.uteq.edu.ec/items/15c24a4a-e62c-4074-a4f0-d73604e02a2e>
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7, 1247-1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Comisión del Codex Alimentarius (FAO/OMS). (2026). *Codex Alimentarius: Normas internacionales de alimentos*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura & Organización Mundial de la Salud. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/en/>
- Córdova Núñez, J. C. (2012). *Estudio de factibilidad para la producción y comercialización de pimienta negra* [Tesis de licenciatura, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio Digital UCE. <https://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/1128/1/T-UCE-0003-61.pdf>
- Dalazen, J. R., Valani, G. P., Vieira, H. D., Ramalho, J. C., Lacerda Jr., V., Romão, W., & Partelli, F. L. (2022). Nutrient accumulation in fruits and grains of black pepper at different ripening stages. *Ciência Rural*, 52(9), e20210470. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210470>
- Damanhour, Z., & Ahmad, A. (2014). A review on therapeutic potential of *Piper nigrum* L. (black pepper): The king of spices. *Medicinal and Aromatic Plants*, 3(3), 161-167. DOI:10.4172/2167-0412.1000161
- De Waard, P. W. (1969). *Foliar diagnosis, nutrition, and yield stability of black pepper (Piper nigrum L.) in Sarawak* [Tesis doctoral, Wageningen University].
- De Waard, P. W. F., & Sutton, C. D. (1960). Toxicity of aluminium to black pepper (*Piper nigrum* L.) in Sarawak. *Nature*, 188(4757), 1129-1130. <https://doi.org/10.1038/1881129a0>

- Díaz-Romeu, R., & Hunter, A. (1978). *Metodologías de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigaciones en invernadero* (Serie Materiales de Enseñanza, No. 12). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT). (2024). *Crops and livestock products*.
- Forsythe, W. (1975). *Manual de laboratorio: Física de suelos* (Serie Libros y Materiales Educativos, No. 25). IICA/CATIE.
- Garbanzo, G., Céspedes, J., Temudo, M., Ramos, T. B., Cameira, M. d. R., Pereira, L. S., & Paredes, P. (2025). Addressing weather data gaps in reference crop evapotranspiration estimation: A case study in Guinea-Bissau, West Africa. *Hydrology*, 12(7), 161. <https://doi.org/10.3390/hydrology12070161>
- Garbanzo-León, G., Vargas-Rojas, J. C., & Vega-Villalobos, E. V. (2024). Growth and nutrients uptake of dragon fruit (*Hylocereus costaricensis* and *H. monacanthus*) cultivated in Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 35, 57493. <https://doi.org/10.15517/am.2024.57493>
- Geetha, C. K., & Nair, P. C. S. (1990). Effect of plant growth regulators and zinc on spike shedding and quality of pepper. *Agricultural Research Journal of Kerala*, 14, 10-12.
- Geisler, J. G., & Gross, G. G. (1990). The biosynthesis of piperine in *Piper nigrum*. *Phytochemistry*, 29(2), 489-492.
- Govindarajan, V. S. (1977). Pepper: Chemistry, technology and quality evaluation. *CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 9(2), 115-225. <https://doi.org/10.1080/10408397709527233>
- Guyang, X., & Hongdun, L. (1997). Dry matter and major nutrient content of *Piper nigrum*. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 18(1), 42-45. <https://www.rdzwx.com/EN/Y1997/V18/I1/42>
- Hamza, S., & Sadanandan, A. K. (2005). Response of black pepper (*Piper nigrum*) to molybdenum nutrition. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 75(5), 294-295. <https://epubs.icar.org.in/index.php/IJAgS/article/view/9359>
- Hau, B. (1993). Mathematical functions to describe disease progress curves of double sigmoid pattern. *Phytopathology*, 83(7), 928. <https://doi.org/10.1094/Phyto-83-928>
- Hollander, M., Wolfe, D. A., & Chicken, E. (2014). *Nonparametric statistical methods* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Hussain, Z., Chaudhri, V. K., Pandey, A., Khan, R., Srivastava, A. K., & Maurya, R. (2017). Isolation and evaluation of piperine from black pepper and white pepper. *World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 6(8), 1424-1430. <https://doi.org/10.20959/wjpps20178-9752>

- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2015). *VI Censo Nacional Agropecuario: Actividades pecuarias, prácticas y servicios agropecuarios*.
- Jones, J. B., Wolf, B., & Mills, H. A. (1991). *Plant analysis handbook: A practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide*. Micro-Macro Publishing.
<https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19921969819>
- Kalra, Y. (Ed.). (1997). *Handbook of reference methods for plant analysis*. CRC Press.
- Kato, A. K. (1978). *Teor e distribuição de N, P, K, Ca e Mg em pimenteiras-do-reino (Piper nigrum L.)* [Dissertação de mestrado, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo].
- Kohlmann, B., Solís, A., Elle, O., Soto, X., & Russo, R. (2007). Biodiversity, conservation, and hotspot atlas of Costa Rica: A dung beetle perspective (Coleoptera: Scarabaeidae: Scarabaeinae). *Zootaxa*, 1457, 1-34. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.1457.1.1>
- Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). *Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment*. *Advances in Geosciences*, 5, 89-97.
<https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- Legates, D. R., & McCabe, G. J., Jr. (1999). Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233-241.
<https://doi.org/10.1029/1998WR900018>
- Lipovetsky, S. (2010). Double logistic curve in regression modeling. *Journal of Applied Statistics*, 37(11), 1785-1793. <https://doi.org/10.1080/02664760903093633>
- Mata, R., Rosales, A., Sandoval, D., Vindas, E., Alemán, B. (2022). Mapa de Órdenes de Suelos de Costa Rica, 2022. Esc. 1:200.000. Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (1991). *Aspectos técnicos sobre cuarenta y cinco cultivos agrícolas de Costa Rica*. Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola.
- Monge, D., Calvo, T., & Morales, F. (2013). Factibilidad de la producción de pimienta (*Piper nigrum*) en La Virgen de Sarapiquí, Heredia, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 26(4), 72-84.
<https://doi.org/10.18845/tm.v26i4.1585>
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2011). *Applied statistics and probability for engineers* (5th ed.). John Wiley & Sons.

- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nguyen, V. L., Nguyen, D., Nguyen, T. V. A., Dinh, T. N. H., Vo, C. C., Nguyen, Q. N., & Nguyen, T. C. V. (2025). Soil acidification and nutrient imbalance under intensive black pepper plantations in the Central Highlands of Vietnam. *Asian Journal of Agriculture*, 9(2), 906-916. <https://doi.org/10.13057/asianjagric/g090257>
- Nybe, E. V., Nair, P. C. S., & Wahid, P. A. (1989). Relationship of foliar nutrient levels with yield in black pepper (*Piper nigrum* L.). *Tropical Agriculture*, 66(4), 345-349. <https://journals.sta.uwi.edu/ojs/index.php/ta/article/view/1895>
- Paduit, N., Pampolino, M., Aye, M., & Oberthür, T. (2018). Nutrient uptake and distribution in black pepper. *Better Crops with Plant Food*, 102, 24-27. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20193192558>
- Partelli, F. L. (2009). Nutrition of black pepper (*Piper nigrum* L.) – a Brazilian experience. *Journal of Spices and Aromatic Crops*, 18(2), 73-83.
- Pillai, K. S., Saraswathy, P., & Thomas, E. J. (1979). Biometric studies on yield and its component characters on pepper (*Piper nigrum* L.). *Current Science*, 48(7), 314-316. <https://www.jstor.org/stable/24081377>
- Prabhakaran Nair, K. P. (2011). *Agronomy and economy of black pepper and cardamom: The “king” and “queen” of spices*. Elsevier.
- Quintero Guagua, J. (2010). *Análisis del proceso de comercialización interna y externa de la pimienta negra en el Ecuador periodo 2005–2009* [Tesis doctoral, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. <https://repositorio.puce.edu.ec/items/79719860-5af8-4d53-bcfd-63f9e8dfbfc7>
- R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Radhakrishnan, V. V., Madhusoodanan, K. J., Kuruvila, K. M., & Vadivel, V. (2002). Production technology for black pepper. *Indian Journal of Arecanut, Spices and Medicinal Plants*, 4(2), 76-80.
- Ravindran, P. N. (Ed.). (2005). *Black pepper (Piper nigrum)*. CRC Press.

- Rodrigues-Dalazen, J., Gontijo, I., de Sá-Paye, H., Pereira-Valani, G., Tomaz, M. A., & Partelli, F. L. (2020). Macronutrient dynamics in leaves and bunches of black pepper. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 55, 1-11. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01780>
- Sadanandan, A. K. (2000). Agronomía y nutrición de la pimienta negra. En P. N. Ravindran (Ed.), *Black pepper (Piper nigrum)* (pp. 163-223). Harwood Academic Publishers.
- Sadanandan, A. K., & Hamza, S. (1993). Nutrition management of red and lateritic acid soils for sustainable spice production in India. In *International Seminar on Red and Lateritic Soils for Sustainable Agriculture* (pp. 114-115).
- Shabani, A., Sepaskhah, A. R., Kamgar-Haghighi, A. A., & Honar, T. (2018). Using double logistic equation to describe the growth of winter rapeseed. *The Journal of Agricultural Science*, 156(1), 37-45. <https://doi.org/10.1017/S0021859617000934>
- Sim, S. L. (1971). Dry matter production and major nutrient contents of black pepper (*Piper nigrum* L.). *Malaysian Agricultural Journal*, 48, 73-6. <https://www.rdzwx.com/EN/Y1997/V18/I1/42>
- Sivaraman, K., Kandiannan, K., Peter, K. V., & Thankamani, C. K. (1999). Agronomy of black pepper (*Piper nigrum* L.) – a review. *Journal of Spices and Aromatic Crops*, 8, 1-18.
- Srinivasan, V., Dinesh, R., Hamza, S., & Parthasarathy, V. A. (2007). Nutrient management in black pepper (*Piper nigrum* L.). *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 2, 62. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20072062>
- Srinivasan, V., Dinesh, R., Krishnamurthy, K., & Hamza, S. (2012). Nutrition and physiology. In H. P. Singh, K. V. Saji, V. A. Parthasarathy, & V. Srinivasan (Eds.), *Piperaceae crops: Production and utilization: Black pepper, betelvine and others*. Westville Publishing House.
- Terrazas, C. S., & Falla, M. R. (2004). *Estudio de factibilidad para el establecimiento del cultivo de pimienta negra (Piper nigrum L.) en el departamento de Izabal, Guatemala para exportación hacia Estados Unidos* [Tesis de licenciatura, Zamorano].
- Veloso, C. A. C., & Carvalho, E. J. M. (1999). Absorção e extração de alguns nutrientes pela cultivar ‘Guajarina’ de pimenta-do-reino. *Scientia Agricola*, 56, 443-447.
- Willmott, C. J. (1982). *Some comments on the evaluation of model performance*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309-1313. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2)

- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). *Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance*. *Climate Research*, 30, 79-82. <https://www.jstor.org/stable/24869236>
- Yap, C. A. (2012). Determination of nutrient uptake characteristic of black pepper (*Piper nigrum* L.). *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2(10B), 1091-1099. <https://www.davidpublisher.com/Public/uploads/Contribute/55d3e0bd4c6a8.pdf>
- Zhu, C., Byrd, R. H., Lu, P., & Nocedal, J. (1997). Algorithm 778: L-BFGS-B: Fortran subroutines for large-scale bound-constrained optimization. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 23, 550-560. <https://doi.org/10.1145/279232.279236>
- Zu, C., Wu, H. S., Tan, L. H., Yu, H., Yang, J. F., & Li, Z. G. (2012). Correlation analysis between soil pH and fertility indicators in hainan black pepper advantageous regions. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 33, 1174-117. <https://www.rdzwx.com/EN/Y2012/V33/I7/1174>
- Zúñiga Sánchez, L. L., Saquicela Rojas, R. A., & Pérez Chamorro, O. B. (2025). Absorción de nutrientes de la pimienta negra (*Piper nigrum*) al inicio de su producción. *Revista Ciencia y Tecnología*, 18(2), 48-58. <https://doi.org/10.18779/cyt.v18i2.913>



Agronomía Costarricense, Universidad de Costa Rica.

Se encuentra licenciada con [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Para mayor información escribir a rac.cia@ucr.ac.cr