

Evaluación de la cobertura de sombra y su influencia en la capacidad productiva y ambiental en dos fincas de café asociadas a Coopetarrazú R.L., Tarrazú, Costa Rica

Assessment of shade cover and its effects on productive and environmental performance in two coffee farms associated with Coopetarrazú R.L., Tarrazú, Costa Rica

Mariajosé Esquivel Fuentes¹  • Rooel Campos Rodríguez²  • Laura Brenes Peralta² 
 • María Fernanda Jiménez Morales²  • Dagoberto Arias Aguilar³ 

Recibido: 27/10/2025

Aceptado: 8/6/2026

Abstract

Current coffee farming seeks to reflect the contribution of its activities to addressing global environmental challenges. Shade canopy management in coffee plantations is commonly guided by production objectives and crop requirements. However, when managed for its capacity to promote diversification and provide environmental services, it acquires additional value for society. Recognizing and valuing the resources available within an agroecosystem is therefore essential. This study evaluated the influence of shade cover on the productive and environmental capacity of two coffee farms associated with CoopeTarrazú R.L. by characterizing the edaphoclimatic conditions and floristic composition of the evaluated systems. Carbon stocks were quantified, biodiversity was assessed as an environmental service, and statistical analyses were conducted to evaluate the influence of the shade canopy on coffee productivity. Finally, a shade design was proposed to enhance the environmental component of coffee cultivation. A total of eight shade-providing plant species were recorded, of which only five were the most representative. The results indicate that shade cover was characterized by a relatively high density of musaceous plants (380 ± 222 individuals ha^{-1}) and a low density of fruit and timber trees. Average shade cover across the two farms was 32%. These findings highlight the importance of improving shade management strategies to strengthen the environmental benefits provided by coffee agroecosystems.

Keywords: Agroforestry, Sustainable Coffee Production, biodiversity, Carbon, floristic composition.

1. Tecnológico de Costa Rica, Maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción, Cartago, Costa Rica mjesquivel84@gmail.com
2. Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Agronegocios, Cartago, Costa Rica, rocampos@tec.ac.cr, labrenes@tec.ac.cr, maria.jimenez@tec.ac.cr
3. Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago, Costa Rica, darias@tec.ac.cr

Resumen

La caficultura actual pretende reflejar el aporte y contribución de su actividad a la problemática global del ambiente. Es común que el dosel de sombra en los cafetales se maneje en función de los objetivos de producción, según las necesidades del cultivo, pero cuando se maneja en función de su capacidad para diversificar y proveer servicios ambientales, adquiere un valor positivo para la sociedad. Resulta importante aprender a dar valor a los recursos disponibles en un agroecosistema, por eso esta investigación evalúa la influencia de la cobertura de sombra sobre la capacidad productiva y ambiental en dos fincas de café asociadas a CoopeTarrazú R.L., caracterizando las condiciones edafoclimáticas y la composición florística de los sistemas evaluados. Se determinó el carbono acumulado, se evaluó la biodiversidad como servicio ambiental y se aplicaron rutinas de análisis estadístico para evaluar la influencia que tiene el dosel de sombra sobre la capacidad productiva del cafetal. Por último, se planteó un diseño de sombra que mejore el componente ambiental del cultivo de café. Se registraron 8 especies de plantas proveedoras de sombra diferentes, solamente 5 especies fueron las más representativas. Se concluye que la cobertura de sombra registra una buena densidad de plantas musáceas (380 ± 222 Ind ha⁻¹), y una baja densidad de árboles frutales y maderables, siendo su promedio de 32 %, ambas fincas evaluadas.

Palabras clave: Agroforestería, Caficultura Sostenible, biodiversidad, Carbono, composición florística.

Introducción

El café constituye una de las materias primas más importantes en la economía mundial [1]. Más de 125 millones de personas, en su mayoría pequeños agricultores, participan en la cadena de valor del café desde el cultivo, procesamiento, transporte y comercialización del grano hasta los dos mil millones de tazas de café que se toman cada día [2], [3].

La producción de café en Costa Rica está dominada, principalmente, por pequeños productores que, agrupados en cooperativas y asociaciones, son responsables de más de la mitad de la producción total de café [4]. A pesar de su participación en esta agrocadena, los agricultores siguen expuestos a la volatilidad de los precios de los productos e insumos, impactando la sostenibilidad de su actividad, puesto que no solo limita su potencial productivo sino su ingreso per cápita [3].

La caficultura actual no solo busca dar soluciones a los productores, sino que pretende reflejar el aporte y

contribución de su actividad a la problemática global del ambiente. La sombra dentro de los cafetales aumenta la estabilidad del ingreso de la finca, disminuye el riesgo financiero y a su vez, provee múltiples servicios ambientales [5]. De hecho, varios estudios han demostrado que los sistemas de café bajo sombra generan variedad de servicios, tales como la fijación de carbono, la conservación del suelo, protección de fuentes de agua, conectividad para la biodiversidad, el mejoramiento del paisaje, entre otros [6], [7]. De acuerdo con De Melo y Abarca [8], la diversidad de servicios y la magnitud de estos, puede variar en función de la estructura (composición de la sombra), del manejo del suelo, del manejo de la sombra y de las características de la finca.

Los árboles y plantas herbáceas asociados al cultivo de café son sistemas integrados con un gran potencial para la provisión de bienes y servicios. Estos sistemas cumplen importantes funciones socio-económicas y ambientales que muchas veces son subestimadas [9]-[11], estos sistemas contribuyen de manera significativa a la conservación del suelo y del agua, al evitar procesos de erosión y reducir el arrastre superficial del recurso hídrico. Además, promueven la biodiversidad de fauna y flora, ya que los árboles y arbustos que conforman la sombra actúan como corredores biológicos que permiten el desplazamiento, refugio y reproducción de distintas especies, fortaleciendo así la conectividad ecológica entre los ecosistemas cercanos.

A nivel productivo, permiten la diversificación de ingresos, mediante la obtención de productos complementarios como madera, leña, frutas y otros recursos aprovechables. En el ámbito ambiental, favorecen la captura de carbono, constituyéndose en un mecanismo efectivo de adaptación y mitigación ante el cambio climático. Finalmente, contribuyen al mejoramiento del paisaje rural, fortaleciendo la integración estética y ecológica del sistema cafetalero con su entorno natural.

En respuesta a lo anterior, esta investigación busca evaluar la influencia de la cobertura de sombra sobre la capacidad productiva y ambiental en dos fincas de café, caracterizando las condiciones edafoclimáticas y la composición florística de los sistemas evaluados. Para esto se consideraría las interrelaciones entre la producción, la productividad y posibles beneficios como carbono acumulado y biodiversidad.

Material y métodos

Lugar de investigación

El estudio se realizó en la Cooperativa CoopeTarrazú R.L., considerada la unidad beneficiadora de café más

Cuadro 1. Resumen general de los sistemas de cultivo de café bajo sombra evaluados en el cantón de Tarrazú, Costa Rica.

Table 1. General characteristics of the shaded coffee production systems evaluated in the canton of Tarrazú, Costa Rica.

Finca	Área (ha)	Elevación (msnm)	Variedad Café	Arreglo Sombra	Edad establecimiento (años)
F1	4,5	1.395	Caturra y Catuaí	Poros y musáceas	20-30
F2	4,5	1.515	Caturra y Catuaí	Mezcla con dominio de poró	20-30

grande de Costa Rica. La selección de cada finca, según la ubicación observada en la Figura 1, siguió criterios como manejo agronómico similar, diseño de sombra representativo de la localidad y ubicación en zonas de producción cafetalera. Además, se consideró la apertura y el consentimiento de los productores para realizar el estudio en sus fincas. El área de estudio se ubicó en Tarrazú (9°36'18,55" N, 84°26'16,40" O), con una elevación entre 1200 y 1900 m s. n. m., en la región de Los Santos, Costa Rica. Tarrazú es el segundo cantón productor de café más grande del país, caracterizado por la producción de café bajo sombra [4].

Caracterización de la cobertura de sombra

Se seleccionaron los sitios procurando que fueran representativos del sistema evaluado, en este caso fincas con café bajo sombra (Cuadro 1). En cada finca se instalaron tres parcelas temporales de forma

rectangular (0,1 ha; intensidad del muestreo = 6 %) para evaluar variables dasométricas como diámetro (d), altura (m), diámetro de copa (m), cantidad de ejes (en el caso de las musáceas) y atributos como nombre científico, nombre común y estado fitosanitario [12],[13], [14]. El estado de salud de cada individuo (vitalidad, presencia de malformaciones, pudriciones u otros asociados con insectos, enfermedades o plagas) se determinó usando tres categorías:

- 1: individuo sano (sin afectaciones de ningún tipo)
- 2: individuo con afectaciones leves o moderadas
- 3: individuo con afectaciones graves o muy graves o muerto

Resumen general de los sistemas de cultivo

Las parcelas de estudio se delimitaron evitando zonas con pendientes pronunciadas (>30 %), áreas de drenaje, terrenos inundables y sitios desiguales o irregulares. Se confeccionó un formulario para anotar los datos dasométricos recopilados en campo. Se realizaron los análisis de diversidad arbórea (familia, género y especie) y de variables dasométricas para caracterizar la composición florística del dosel de sombra y, con esto, comparar los sistemas agroforestales de ambas fincas.

Influencia de la cobertura de sombra sobre el sistema

Se tomaron muestras del suelo en cada una de las fincas seleccionadas utilizando un barreno, en lugares representativos de la finca, a dos profundidades diferentes: 10 cm y 20 cm. Se aplicó la técnica del cuarteo [15], [16] para cada lote de muestreo y para cada categoría de profundidad. Las muestras fueron etiquetadas y almacenadas para su posterior envío al laboratorio del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA).

Se realizó también un muestreo foliar de las plantas de café, tomando una muestra representativa de 30 a 40 hojas por lote de forma aleatoria, pero evitando hojas muy jóvenes o maduras [15], [16]. Los resultados de ambos muestreos fueron sistematizados y, posteriormente, se calculó un índice de manejo nutricional para cada finca.

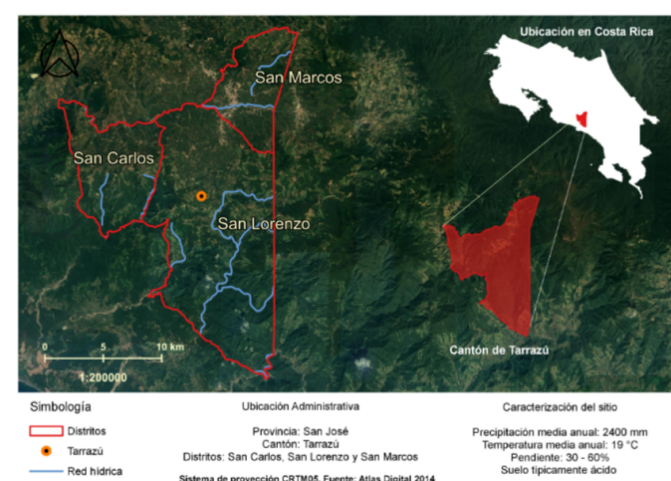


Figura 1. Localización del sitio de estudio para la evaluación del componente agroforestal y su influencia en la capacidad productiva y ambiental en dos fincas de café asociadas a CoopeTarrazú R.L., Costa Rica.

Figure 1. Location of the study site used to evaluate the agroforestry component and its influence on the productive and environmental performance of two coffee farms associated with CoopeTarrazú R.L., Costa Rica.

Los cálculos se basaron en la relación del análisis foliar del café y el análisis químico del suelo considerando como variables el pH, la suma de bases ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$), la materia orgánica y la calidad del hábitat. La creación del índice implicó la ponderación de cada una de las variables por igual, usando una escala de 0,0 a 1,0 [17]. Usando el criterio de experto y la consulta de literatura científica, se determinaron los valores entre 0,0 y 1,0 para cada variable; se obtuvo la curva de ajuste, se multiplicó por el puntaje y se calculó el índice según la siguiente ecuación:

$$I_{\text{manejo}} = pH + CH + MO + \text{Suma de bases} \quad (1)$$

Donde: I_{manejo} es el índice de manejo nutricional (adimensional); pH es el valor de acidez del suelo (unidades de pH); CH es la calidad del hábitat es la puntuación asignada según los indicadores de biodiversidad y cobertura arbórea; MO es el contenido de materia orgánica y *Suma de Bases* es la concentración de cationes ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$) expresada en $\text{cmol (+)} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Los cálculos para construir las curvas de ajuste para cada variable se basaron en datos reportados en estudios sobre el café, aplicando el criterio de experto en cada una de ellas (Cuadro 2).

Evaluación de la biodiversidad del sistema

Para evaluar la biodiversidad de los sitios se calculó el Índice de Valor de Importancia (IVI) para identificar especies con mayor dominancia dentro de la comunidad vegetal y el Índice de Shannon (H') para comparar la diversidad de especies con respecto a otros sistemas agrícolas [18], [19], [20]. Para la valoración del servicio ambiental biodiversidad se utilizó la metodología propuesta por Medina et al. (2006), la cual utiliza criterios e indicadores previamente establecidos para valorar la calidad del hábitat y el impacto del uso de agroquímicos en sistemas agroforestales.

El criterio de calidad de hábitat se estimó a partir de cinco indicadores: número de estratos arbóreos, riqueza de especies nativas, densidad de árboles y arbustos con diámetro a la altura del pecho (DAP) superior a 5 cm, incidencia de epífitas y porcentaje de cobertura de sombra. Estos indicadores permitieron caracterizar la complejidad estructural y el potencial del sistema para albergar flora y fauna asociada.

El criterio de uso de agroquímicos consideró la frecuencia de aplicación de herbicidas, pesticidas y fertilizantes. Cada aplicación fue ponderada según la categoría toxicológica del producto empleado, asignando mayores penalizaciones a productos de mayor toxicidad. Para los fertilizantes químicos se

Cuadro 2. La rúbrica de clasificación según el índice de manejo nutricional que se obtenga es la siguiente:

Table 2. Classification criteria based on the nutritional management index obtained.

Índice de manejo nutricional	Valor de clasificación
Muy bajo	$1 \leq x \leq 2$
Bajo	$3 \leq x \leq 4$
Moderado	$5 \leq x \leq 6$
Alto	$7 \leq x \leq 8$
Muy alto	$9 \leq x \leq 10$

aplicó una penalización fija por aplicación debido a sus posibles efectos sobre la biología del suelo.

El valor del índice es la diferencia entre la calidad del hábitat y el uso de agroquímicos: [indicador calidad del hábitat – uso de agroquímicos] [22]. Señalar que la asignación de puntajes para cada componente se realizó conforme a los rangos de valoración establecidos en la metodología utilizada.

La estimación de biomasa aérea y carbono acumulado se realizó a partir de los datos dasométricos obtenidos en campo, utilizando ecuaciones alométricas reportadas para sistemas agroforestales tropicales y lineamientos metodológicos del IPCC [23], [24]. Para las especies arbóreas se consideraron variables como diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total y densidad de individuos. En el caso de las musáceas, la biomasa se estimó utilizando el número de ejes o pseudotallos registrados por unidad de área, considerando su aporte estructural dentro del sistema agroforestal. Posteriormente, la biomasa arriba del suelo se convirtió a carbono utilizando el factor de conversión recomendado por el IPCC. Todos los valores fueron extrapolados a toneladas por hectárea.

Para evaluar la interacción de la sombra y la productividad del café (fanegas ha^{-1}), se estimó la cosecha cuantificando el número de cafetos por finca y la cantidad promedio de granos por cafeto [25]. Previo al análisis de correlación, se realizó una exploración descriptiva de los datos y una verificación de supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza mediante análisis gráfico y estadísticos descriptivos. Debido al carácter exploratorio del estudio y al tipo de variables cuantitativas evaluadas, se empleó el coeficiente de correlación de Pearson para identificar posibles asociaciones lineales entre variables relacionadas con cobertura de sombra, biodiversidad, captura de carbono y productividad. Los análisis se realizaron utilizando el paquete estadístico InfoStat 2018, con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

Dado que el estudio se desarrolló únicamente en dos fincas cafetaleras, los resultados obtenidos deben interpretarse dentro de un alcance exploratorio y descriptivo. Aunque se establecieron parcelas temporales para aumentar la representatividad interna de cada sistema evaluado, el tamaño de muestra limita la capacidad de extrapolar los resultados a otros sistemas cafetaleros de la región. En consecuencia, las relaciones identificadas entre variables corresponden a tendencias observadas bajo las condiciones particulares de las fincas estudiadas.

$$y=a+bx \quad (2)$$

Donde: y representa la variable dependiente; x la variable independiente; a la ordenada al origen y b la pendiente o coeficiente de regresión.

Resultados y Discusión

Caracterización de la cobertura de sombra

Composición florística de la sombra

En conjunto, se registraron ocho especies presentes en los cafetales evaluados; cinco de ellas son las más representativas: musáceas (*Musa* sp.), poró gigante (*Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F. Cook), poró copey

(*Erythrina fusca* Lour.), gravilla (*Grevillea robusta* A. Cunn. Ex R. Br.) y cedro rosado (*Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn.). (Figura 2).

En cuanto a arquitectura y ecología, los sistemas de café bajo sombra se asemejan más a un bosque que otros sistemas agrícolas. En Costa Rica, la diversidad arbórea y arbustiva en cafetales puede alcanzar cifras de más de 250 especies forestales en asocio con café [24].

Cobertura de sombra

El Cuadro 3 resume los resultados sobre estructura y diversidad de árboles y plantas herbáceas en ambas fincas. Los mayores porcentajes de sombra en los sistemas evaluados se relacionaron con la cobertura arbórea y la densidad de musáceas (380 ind ha⁻¹). En Costa Rica se reportaron densidades de sombra con musáceas de 450 ind ha⁻¹ [26]. La distribución de la sombra fue homogénea y se manejó en función de la capacidad productiva y ambiental del sistema.”

La cobertura de sombra promedio fue de 32 %, con una desviación estándar de 2 % (32 ± 2 %). El porcentaje de cobertura de sombra adecuado para el cultivo de café oscila entre 20 – 40 % [27], dado que permite niveles aceptables de productividad [8]. En particular, altas condiciones de radiación pueden disminuir la tasa de fotosíntesis de las hojas de café [28], sin embargo, la fotosíntesis del cafeto no se reduce en condiciones de sombra inferiores a 55 % [38], [11].

La sombra permite regular los extremos de temperatura en el dosel del café, pero el efecto de la sombra sobre el café (positivo o negativo) puede variar según las condiciones climáticas locales, el manejo del cultivo, y la composición de la sombra [11].

Se observó en estas fincas que los asociados de café con árboles maderables o frutales son menos frecuentes que los sistemas agroforestales con árboles de servicio. Incluso, es más frecuente ver asociados con plantas musáceas (banano, plátano y guineo).

Tal como se observa en el Cuadro 3, en Finca 1 no se encontraron árboles maderables o frutales, no obstante, ambas fincas registran una adecuada densidad de plantas musáceas (380 ± 222 ind ha⁻¹), en su mayoría utilizadas para consumo familiar o animal. Los cafetales en su mayoría tienen una ventaja importante para la producción de madera como producto complementario de ingresos económicos [6]. Por lo que, podría haber potencial en estas fincas para que introduzcan árboles maderables en sus sistemas, puesto que el inventario reporta poca o nula presencia de especies maderables.

Desde una perspectiva agroecológica, la sombra no debe considerarse únicamente como un componente

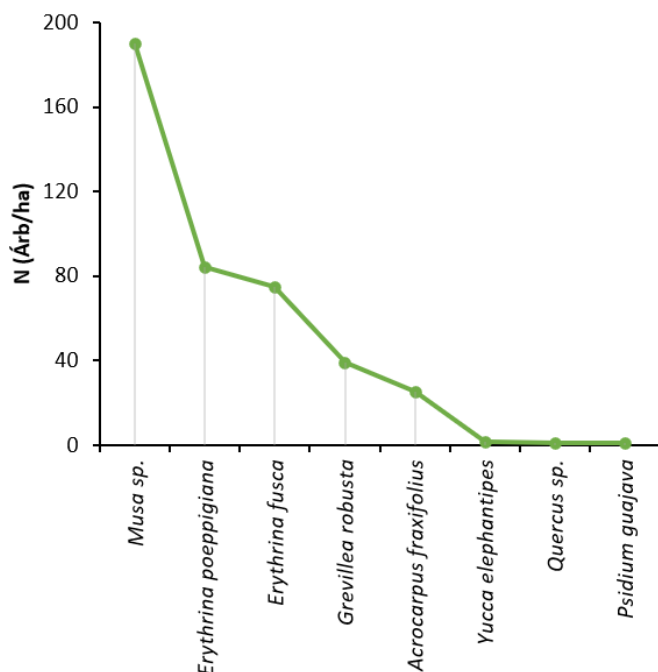


Figura 2. Número de individuos por hectárea (Parcelas de 1000 m² / n=6).

Figure 2. Number of individuals per hectare (1,000 m² plots; n = 6).

Cuadro 3. Estructura y diversidad de árboles y plantas herbáceas en 2 fincas con sistemas de cultivo de café bajo sombra ubicados en el cantón de Tarrazú, Costa Rica.

Table 3. Structure and diversity of trees and herbaceous plants in two shaded coffee farms located in the canton of Tarrazú, Costa Rica.

Variable	F1 (n=24)	F2 (n=24)	Promedio (n=48)
Densidad de cafetos (Ind ha ⁻¹)	4640 ± 637	4570 ± 727	4605 ± 49
Densidad de árboles de servicio (Ind ha ⁻¹)	437 ± 76	463 ± 225	450 ± 18
Densidad de árboles frutales (Ind ha ⁻¹)	N/A	10	10
Densidad de árboles maderables (Ind ha ⁻¹)	N/A	10	10
Densidad de plantas musáceas (Ind ha ⁻¹)	537 ± 67	223 ± 123	380 ± 222
Cobertura de sombra (%)	33 ± 15	30 ± 16	32 ± 2

Nota: Los datos corresponden a valores promedios. ± DE= Desviación Estándar. Musáceas: incluye banano, plátano y guineo. Árboles de servicio: incluye principalmente *Erythrina* spp, *Grevillea* spp, *Inga* spp, y otros. Árboles frutales: incluye *Persea* spp, *Eriobothrya* spp y *Psidium* spp. Árboles maderables: incluye principalmente *Eucalyptus* spp y *Quercus* spp.

estructural del sistema, sino como un elemento que influye sobre múltiples procesos ecológicos, incluyendo la conservación de la biodiversidad, la captura de carbono y la resiliencia frente a eventos climáticos extremos.

Estado fitosanitario

Con respecto al estado fitosanitario, cada individuo registrado durante el inventario fue clasificado en una escala cualitativa de tres categorías, basada en observaciones de campo, donde se reportó que el 47 % de los individuos se encuentran en condiciones buenas (individuo sano, sin afectaciones visibles), 32 % en condiciones regulares (individuo con afectaciones leves o moderadas), y 21 % en malas condiciones (individuo con afectaciones graves, muy graves o muerto), principalmente los árboles de poró gigante (*E. poeppigiana*), que han sufrido afectación por plagas (Figura 3). Además, varios árboles de poró copey (*E. fusca*) y gravilea (*G. robusta*) presentan afectaciones físicas asociadas a inadecuadas prácticas de poda y algunos árboles más antiguos se han ido deteriorando con el paso de los años (Figura 4).

En relación con la plaga del p. gigante, se podría tratar de una especie invasiva que ha sido reportada como una plaga del género *Erythrina*: *Quadrastichus erythrinae* (Hymenoptera: Eulophidae: Tetrastichinae). Dicho ataque corresponde a un insecto del género *Quadrastichus*, que ha sido observado afectando a *E. poeppigiana*, *E. costarricensis*, *E. fusca*, y *E. berteriana*, muchas de estas especies son utilizadas como árboles de sombra en cafetales o como postes de cerca viva [29]. De hecho, fue detectada en Costa Rica, en altitudes que van desde los 370 m hasta los 2100 msnm [29]. Este rango incluye las fincas evaluadas que se encuentran entre los 1300 y 1500 msnm.



Figura 3. Estado fitosanitario de árboles de poró (*Erythrina* spp) en asocio con cultivos de café, Tarrazú, Costa Rica. (a) Pudrición y hongos; (b) Malformación por podas inadecuadas

Figure 3. Phytosanitary condition of poró trees (*Erythrina* spp.) associated with coffee plantations in Tarrazú, Costa Rica. (a) Stem decay and fungal infection; (b) Tree deformation resulting from improper pruning practices.

En la Figura 5, se puede observar el estado fitosanitario en cada parcela (n=6). La finca F1 contienen la mayor proporción de individuos con afectaciones graves (Sanidad 3), mientras que, en la finca F2, la salud de los individuos va de regular a buena (Sanidad 1 y 2). Las afectaciones leves en la mayoría de los árboles de poró y gravilea tienen como móvil la poda, ya que se debe aplicar un cicatrizante que prevenga la entrada de hongos y microorganismos.



Figura 4. Estado fitosanitario de árboles de poró gigante (*Erythrina poeppigiana*) en asocio con café, Tarrazú, Costa Rica. (a) Copa con poco crecimiento; (b) Daño en ramas por perforaciones de insectos; (c) Abultamiento de tallos en ramas y (d) Daño por insectos defoliadores

Figure 4. Phytosanitary condition of giant poró trees (*Erythrina poeppigiana*) associated with coffee plantations in Tarrazú, Costa Rica. (a) Reduced crown development; (b) Branch damage caused by insect boring activity; (c) Swelling of stems and branches; and (d) Damage caused by defoliating insects.

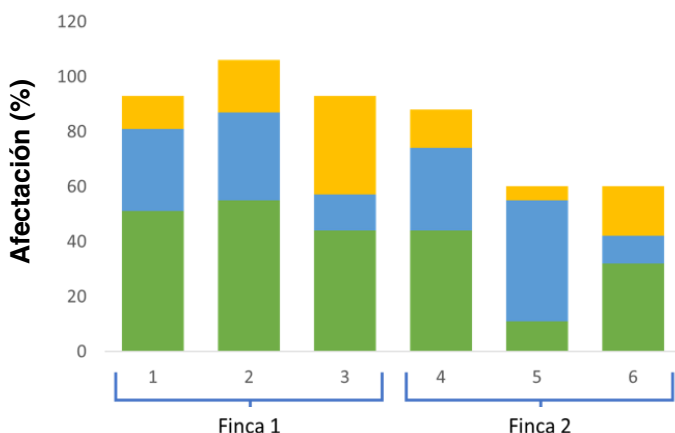


Figura 5. Diagnóstico general del estado fitosanitario de los árboles y musáceas en asocio con el cultivo de café en 2 fincas del cantón de Tarrazú, Costa Rica.

Figure 5. General phytosanitary status of trees and musaceous plants associated with coffee cultivation on two farms in the canton of Tarrazú, Costa Rica.

Tomando en cuenta los resultados en cuanto a composición, cobertura de sombra y estado fitosanitario, se podría considerar la posibilidad de mejorar el diseño del sistema, ampliando el tipo de sombra en las fincas, sobre todo en aquellas con poca riqueza de especies, como la Finca 1.

Influencia de la cobertura de sombra sobre el sistema

Nutrición mineral del cafeto y su relación con la sombra

El Cuadro 4 resume el resultado del análisis químico completo del suelo para las fincas evaluadas, ya que es

indispensable valorar la influencia de la sombra sobre la salud de suelo, el estado nutricional del cultivo de café, y su rendimiento (productividad).

El cultivo de café crece mejor en suelos con niveles de pH comprendidos entre 5 y 6. El nivel de pH promedio obtenido es de 4,80; el cual es un valor típico de los suelos de esta región, que por lo general se caracteriza por su alta acidez y bajo contenido de bases [25]. En cuanto al contenido de materia orgánica, se obtuvo un valor promedio de 6,39 %. Este valor se encuentra dentro del rango óptimo para el cultivo, factor que se relaciona la calidad, la sostenibilidad y, ante todo, el rendimiento del cultivo [12].

La deficiencia en suelos cafetaleros está estrechamente relacionada con alta acidez, deficiencias de Ca y Mg, insuficiencia de K y desequilibrios iónicos entre bases, por eso el asocio con árboles, arbustos y herbáceas resulta ventajoso, puesto que no solo rehabilita el suelo, sino que, aumenta su fertilidad y calidad [15]. Cuando la radiación de luz es directa (cafetales a pleno sol) se acelera la descomposición de materia orgánica y otros nutrientes, por lo que el suelo va perdiendo calidad [30].

De hecho, las condiciones de sombra en cultivos de café no solo elevan los niveles de materia orgánica fresca, sino que mejoran las condiciones físicas del suelo, favoreciendo la retención de humedad y el desarrollo de microorganismos [31],[30].

Este aporte se genera a partir de la producción y descomposición de la hojarasca y de los residuos de las podas y arreglos de sombra en los sistemas [31].

En el Cuadro 5, se presentan los resultados del análisis foliar. Para cada elemento, se obtuvieron los valores

Cuadro 4. Resultado del análisis químico completo del suelo en 2 fincas con sistemas de cultivo de café bajo sombra ubicados en el cantón de Tarrazú, Costa Rica.

Table 4. Results of the complete soil chemical analysis for two shaded coffee farms located in the canton of Tarrazú, Costa Rica.

Finca Variable	F1	F2	Nivel Crítico*	
			Inferior	Superior
pH	4,80	4,82	5,60	6,50
K (Cmol(+)/L)	0,53	0,53	0,20	0,60
Ca (Cmol(+)/L)	1,12	1,22	4,00	20,00
Mg (Cmol(+)/L)	0,51	0,52	1,00	5,00
Acidez (Cmol(+)/L)	2,09	1,97	0,50	1,50
P (mg/L)	7,89	6,39	10,00	20,00
Fe (mg/L)	187,82	153,94	10,00	100,00
Cu (mg/L)	5,20	5,27	2,00	20,00
Zn (mg/L)	2,88	2,84	2,00	10,00
Mn (mg/L)	28,55	23,98	5,00	50,00
M.O (%)	6,54	6,24	3,00	8,00
% Sat. Acidez	46,78	43,47	10,00	50,00

Los niveles críticos se basan según Meléndez y Molina [15].

Cuadro 5. Resultado del análisis químico foliar en 2 fincas con sistemas de cultivo de café bajo sombra ubicados en el cantón de Tarrazú, Costa Rica.

Table 5. Results of the foliar chemical analysis for two shaded coffee farms located in the canton of Tarrazú, Costa Rica.

Finca Elemento	F1	F2	Niveles críticos*		
			Bajo	Suficiente	Alto
N (%)	3,18	3,07	< 2,3	2,3 - 2,8	> 2,8
P (%)	0,14	0,13	< 0,12	0,12 - 0,20	> 0,20
Ca (%)	1,1	1,13	< 1,1	1,1 - 1,7	> 1,7
Mg (%)	0,23	0,23	< 0,20	0,20 - 0,35	> 0,35
K (%)	2,07	2,02	< 1,7	1,7 - 2,7	> 2,7
Fe (mg/kg)	184	192	< 75	75 - 275	> 275
Cu (mg/kg)	14	13	< 6	6 - 12	> 12
Zn (mg/kg)	12	10	< 15	15 - 30	> 30
Mn (mg/kg)	145	122	< 50	50 - 150	> 150

Los niveles críticos se basan según Meléndez y Molina [15].

promedio y se comparó con niveles críticos propuestos para el cultivo de café por el Laboratorio de Suelos y Foliare del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica –CIA/UCR [15], donde el estado de nutrición de la planta se categoriza según cada elemento como: Bajo, Suficiente y Alto.

Tal como se observa en el cuadro, ambas fincas presentan valores, que en su mayoría califican como suficiente (P, Ca, Mg, K, Fe, Zn y Mn) y alto (N y Cu). La nutrición adecuada de las plantas es esencial en la producción moderna de café [32], por ello es necesario comprender la relación entre el manejo de los suelos y la nutrición mineral del cultivo.

El índice de manejo nutricional busca resumir y simplificar los resultados de ambos análisis para evaluar la interacción entre nutrientes y calidad del hábitat y con ello, promover estrategias de gestión más eficientes con mayor sostenibilidad ambiental y económica [31], [32]. De forma global, en el Cuadro 6 se observa la calificación del índice de manejo nutricional que relaciona cuatro variables: materia orgánica, suma de bases (Ca, K, Mg), pH y Calidad del hábitat.

De acuerdo con el valor de calificación, ambas fincas tienen un manejo nutricional alto ($7 \leq x \leq 8$). La mayor diferencia está en el indicador de calidad de hábitat, ya que el valor de la F2 es de 7 contra 5.02 de la F1; el resto de las variables son similares entre ambas fincas evaluadas. La intención de relacionar el rendimiento del café y las propiedades de fertilidad del suelo con la calidad del hábitat permitió construir ecuaciones para obtener valores y poder clasificar el estado general de la finca.

El principio de dicho indicador es comprender que el cultivo de café responde a una serie de factores que, de forma directa o indirecta, inciden en el rendimiento y el estado nutricional de cafeto. Por ejemplo, la disponibilidad de nutrimentos en el suelo, donde en ambas fincas los niveles de Ca y Mg están por debajo del nivel crítico, según Meléndez y Molina [15] y, por otro lado, las reservas de materia orgánica también representan un factor importante, ya que la sombra juega un papel fundamental en la dinámica nutricional de la planta. Esto se debe a que, conforme aumenta la temperatura dentro del sistema, disminuye el contenido de materia orgánica [31]- [33].

Biodiversidad de los sitios

Se evaluó la importancia ecológica de las especies dentro del sistema agroforestal mediante el índice de valor de importancia (IVI) y el índice de diversidad de Shannon (H') (Cuadro 7).

En cuanto a biodiversidad, las fincas tienen una combinación de varias especies en sus sistemas, sin

Cuadro 6. Determinación del índice de manejo nutricional de las fincas evaluadas.**Table 6.** Nutritional management index of the evaluated farms.

Variable	Importancia relativa	Curva de ajuste*	Valor del indicador	Rendimiento relativo
Materia orgánica	2	0.99	6.54	1.98
Suma de bases (Ca+Mg+K)	1.5	0.32	2.16	0.47
pH	2.5	0.67	4.80	1.68
Calidad de habitat	4	0.87	5.02	3.50
Índice de manejo nutricional F1				7.63
Materia orgánica	2	0.98	6.25	1.96
Suma de bases (Ca+Mg+K)	1.5	0.32	2.27	0.49
pH	2.5	0.68	4.82	1.70
Calidad de habitat	4	0.96	7.00	3.83
Índice de manejo nutricional F2				7.97

Cuadro 7. Evaluación de la biodiversidad de árboles y plantas herbáceas en 2 fincas con sistemas de cultivo de café bajo sombra ubicados en el cantón de Tarrazú, Costa Rica.**Table 7.** Assessment of biodiversity of trees and herbaceous plants in two shaded coffee farms located in the canton of Tarrazú, Costa Rica.

Finca	Composición del dosel de sombra	IVI musáceas	IVI poros	*Cantidad de especies	*Cantidad de familias	Índice de Shannon
F1	Poros y musáceas	39	60	3	2	1,02
F2	Mezcla con dominio de poró	27	41	6	4	1,60

* No incluye las musáceas (genotipos de plátano, banano y guineo)

embargo, predominan los poros y las musáceas. La F2 presenta mayor cantidad de especies y familias, de hecho, tiene un índice de Shannon de 1,60 mientras que la F1 presenta un valor de Shannon de 1,02. La riqueza de especies vegetales varía entre fincas de una misma región, en efecto, se reportan índices de diversidad de Shannon en sistemas agroforestales en Centroamérica que oscilan entre 1,57 y 3,08 [18].

Para la valoración ecológica del componente forestal, se evaluó la calidad del hábitat. Para esto, es necesario tomar en cuenta que la calidad depende del manejo de la finca, por ejemplo, el uso de agroquímicos [21]. Tal como se observa en el Cuadro 8, el valor de la biodiversidad es la diferencia entre la calidad del hábitat y el uso de agroquímicos.

En cuanto al criterio de calidad del hábitat, la finca F2 presenta un valor de 7. En este hábitat se encontraron 3 especies nativas y 3 especies exóticas, distribuidas en tres estratos (Bajo=<5 m, Medio bajo=5-10 m y Medio alto=10-15 m). En contraste, el hábitat de la finca F1 presentó un valor de 5, donde se contabilizan

2 especies nativas y 1 especie exótica, distribuidas en dos estratos: Bajo y Medio Bajo. Cabe mencionar que las musáceas fueron descartadas en este análisis, sin embargo, forman parte del hábitat evaluado.

Durante el muestreo de las fincas se observó que la cepa de muchas musáceas está formada por varios ejes o tallos, desde 1 hasta 12 por cepa. La mayoría de las cepas tienen de 1 a 5 tallos, el resto oscila entre 6 y 9 tallos, y en menor cantidad se pudieron observar cepas con 10, 11 y hasta 12 tallos. Manejar adecuadamente la cepa, significa manejar el número de pseudotallos para que no ocupe mucha superficie (dominancia= área basal) en los cafetales, si la cepa no se maneja correctamente puede extenderse y restar espacio para el cultivo.

Algunas especies tienen gran potencial en la conservación de la biodiversidad, ya que aumentan la conectividad de las poblaciones, comunidades y procesos ecológicos en paisajes fragmentados [34], funcionando como lugares de tránsito de fauna e insectos. En efecto, muchas de estas especies

Cuadro 8. Evaluación de la biodiversidad como servicio ambiental en 2 fincas con sistemas de cultivo de café bajo sombra ubicados en el cantón de Tarrazú, Costa Rica.

Table 8. Assessment of biodiversity as an environmental service in two shaded coffee farms located in the canton of Tarrazú, Costa Rica.

Indicador		F1	F2
Calidad de hábitat	No. de estratos arbóreos	2	3
	No. de especies nativas	2	3
	No. de árboles > 5 cm diámetro	0.37	0.39
	Presencia de epifitas	0.32	0.31
	Porcentaje de sombra	0.33	0.30
	Calidad de hábitat	5.02	7.00
Uso de agroquímicos	Herbicidas	0	0
	Pesticidas	0	0
	Fertilizantes	-3	-4
	Uso de agroquímicos	-0.3	-0.4
	Índice de Biodiversidad	4.72	6.60

Cuadro 9. Estimación de carbono acumulado en biomasa aérea de árboles y plantas herbáceas en 2 fincas con sistemas de cultivo de café bajo sombra ubicados en el cantón de Tarrazú, Costa Rica.

Table 9. Estimation of aboveground biomass carbon stocks of trees and herbaceous plants in two shaded coffee farms located in the canton of Tarrazú, Costa Rica.

Variable	F1 (n=24)	F2 (n=24)	Total (n=48)
Biomasa arriba del suelo (ton ha ⁻¹)	3,53 ± 1,72	1,04 ± 0,68	2,29 ± 1,76
Carbono acumulado (ton ha ⁻¹)	1,55 ± 0,76	0,46 ± 0,30	1,01 ± 0,77
Dioxido de Carbono (ton ha ⁻¹)	5,70 ± 2,77	1,68 ± 1,09	3,69 ± 2,84

ofrecen servicios ambientales que han ido retomando valor, tal como el secuestro de carbono para mitigar el calentamiento global, aspectos estéticos como el mejoramiento del paisaje, la protección de suelos y la conservación del recurso hídrico.

El uso de agroquímicos se presentó con mayor intensidad en finca F2 reportando un valor de -0.4, principalmente por el uso de fertilizantes. El control de malezas en la finca F1 se hace de forma manual

(chapia), mientras que en la finca F2 se hace una combinación de prácticas manuales (chapia) con químicas (herbicida). No obstante, la aplicación de herbicidas es poco frecuente, se hace solo para buscar un mejor control de malezas [25], pero lo que prima es reducir en lo posible el impacto ambiental.

El cultivo de café recibe al menos 3 fertilizaciones al año y se pueden observar las técnicas para evitar procesos de volatilización y filtración de los compuestos, esto podría ayudar a mitigar el impacto ambiental [25]. Los agroecosistemas ofrecen un hábitat agradable para la conservación de flora y fauna. La finca F2 obtuvo un mayor índice de biodiversidad con respecto a la finca F1, dado principalmente por las diferentes combinaciones de especies arbóreas de cada finca evaluada.

Las diferencias observadas en los índices de biodiversidad entre las fincas parecen estar asociadas principalmente con la composición y diversidad de especies arbóreas presentes en cada sistema. La presencia de distintos estratos de vegetación y una mayor riqueza florística incrementan la disponibilidad de nichos ecológicos y recursos para fauna asociada, favoreciendo la conservación de organismos como aves, insectos polinizadores y enemigos naturales de plagas.

En sistemas cafetaleros bajo sombra, la biodiversidad constituye un componente funcional que contribuye a la estabilidad ecológica del agroecosistema. Por esta razón, estrategias de diversificación arbórea pueden generar beneficios que trascienden la conservación biológica y se reflejan en servicios ecosistémicos relevantes para la producción agrícola.

Estimación del carbono acumulado

Los sistemas agroforestales con café permiten acumular más carbono que las plantaciones de café a pleno sol, puesto que incorporan árboles en su sistema de cultivo. El sistema de café bajo sombra que acumuló más carbono fue la finca F1 con un total de 1,55 t ha⁻¹; y la finca de menor almacenamiento fue la F2 con 0,46 t ha⁻¹ (Cuadro 9). Es evidente que la cantidad de carbono acumulado depende de un sinnúmero de factores, entre ellos las condiciones de sitio (clima y suelo), el número de individuos (árboles y plantas herbáceas) y la edad (tasa de fijación).

Con relación a la cantidad de biomasa arriba del suelo (BAS) de los sistemas evaluados obtuvo un valor promedio de 2,29 t ha⁻¹, con una desviación estándar de ± 1.76 t ha⁻¹. Las musáceas son las que aportan mayor peso al valor de biomasa, y, por ende, al valor del carbono y el CO₂ [26]. Los ecosistemas cafetaleros contribuyen en la fijación de carbono atmosférico y deberían de recibir algún incentivo por el servicio ambiental que prestan.

Cuadro 10. Productividad y variables evaluadas.**Table 10.** Productivity and associated variables.

Variable	F1	F2
Rendimiento estimado (fanegas ha ⁻¹)	50	70
Cobertura de Sombra (%)	33 ± 15	30 ± 16
Densidad de cafetos (Ind ha ⁻¹)	4640 ± 637	4570 ± 727

La biomasa abajo del suelo no fue objeto de estudio en esta investigación sin embargo es un componente importante para monitorear la salud del sistema, es decir la salud del suelo, sustrato productivo sobre el que crecen las plantas de café y el dosel de sombra. Los suelos en sistemas agroforestales con café almacenan cantidades apreciables de carbono proveniente de la descomposición de hojas y ramas secas [35].

Interacción de la sombra y la productividad del café

El rendimiento del café puede verse afectado por distintas variables bióticas y abióticas como especie y variedad, suelo, manejo y entre otras se destaca la sombra. Sin embargo, un diseño y manejo adecuado de la sombra puede significar un aumento en los niveles de productividad del café, incluso puede mejorar su desempeño ambiental, y la sostenibilidad de la actividad agrícola.

Las variables analizadas fueron número de individuos (N), porcentaje de cobertura de sombra (%), captura de carbono (Carbono), índice de biodiversidad (Biodiversidad) y productividad (Rendimiento). Los análisis evidenciaron tendencias de asociación entre las variables N y Carbono, con un valor de Pearson de 0,65 y un $p=0,0001$ y las variables % Sombra y Biodiversidad, con un valor de Pearson de 0,71 ($p=0,0001$). No obstante, debido al tamaño de la muestra, estas relaciones deben interpretarse únicamente como asociaciones exploratorias.

Los valores de significancia del resto de las variables no aportan estadísticamente a las relaciones lineales exploratorias entre variables, por lo que se debe

trabajar con las variables N-Carbono y % Sombra-Biodiversidad (Figura 6). La correlación existente entre dos variables no significa necesariamente una relación causal, ya que depende de otras variables, y su efecto podría ser indirecto, es decir producto de una tercer o cuarta variable [36].

Sin embargo, se puede interpretar que un incremento en la cobertura arbórea podría favorecer la disponibilidad de hábitats, nichos ecológicos y recursos para diferentes grupos de organismos dentro del sistema. Por otro lado, la asociación observada entre el número de individuos arbóreos y el carbono acumulado podría reflejar la importancia de la densidad arbórea en la capacidad de captura y almacenamiento de carbono. Es decir, a medida que aumenta el número de árboles presentes en el sistema, se incrementa la biomasa aérea y, por consiguiente, la cantidad de carbono retenido en la vegetación. Este resultado confirma el papel de los sistemas agroforestales como una alternativa de producción agrícola con potencial para contribuir a la mitigación del cambio climático y a la provisión de servicios ecosistémicos.

Según los resultados el grado de asociación que existe entre las variables analizadas es positivo. Caso contrario sucede con la variable productividad, cuyo grado de asociación resultó negativo, es decir no se encontró relación estadística con el resto de las variables. En otras palabras, no se detectó una asociación estadística de la variable productividad con respecto a las variables evaluadas.

Aunque la cobertura arbórea y la composición del dosel pueden influir en el rendimiento del cultivo, los resultados obtenidos no mostraron relaciones estadísticas consistentes entre la productividad y las demás variables evaluadas (Cuadro 10). Esto sugiere que otros factores agronómicos y de manejo podrían estar ejerciendo una mayor influencia sobre el rendimiento del café en las condiciones estudiadas.

Variables como la fertilidad del suelo, el estado nutricional del cultivo, la densidad de siembra, la edad de las plantaciones, las prácticas de manejo, la incidencia de plagas y enfermedades, así como las condiciones climáticas particulares de cada finca,

Cuadro 11. Ecuaciones lineales exploratorias derivadas de las asociaciones entre biodiversidad y carbono acumulado en sistemas agroforestales a partir de variables como porcentaje de sombra (% Sombra) y Número de individuos (N).**Table 11.** Exploratory linear models relating biodiversity and carbon stocks in agroforestry systems based on shade percentage (% shade) and number of individuals (N).

Relación	Ecuación	R ²	r de Pearson	P
Biodiversidad vs Porcentaje de Sombra	$y=0,64+0,04 (\% \text{ sombra})$	0,541	0,71	0,0001
Carbono vs Número de individuos	$y=-0,51+0,15 (N)$	0,4225	0,65	0,0001

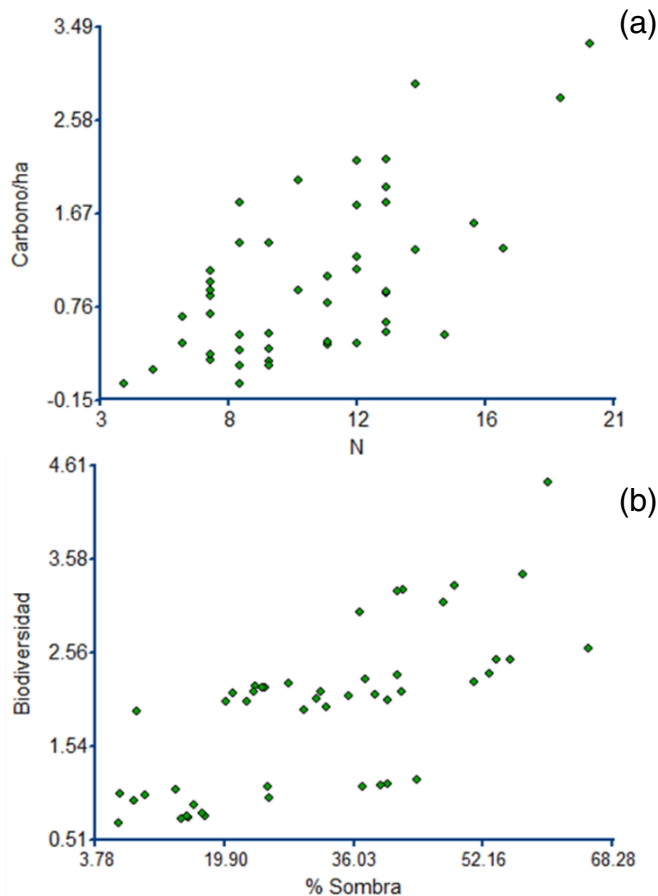


Figura 6. Correlación entre variables. Relación Número de individuos – Captura de carbono (a); Relación Porcentaje de Sombra – Biodiversidad (b).

Figure 6. Correlations between variables: number of individuals vs. carbon storage (a); shade percentage vs. biodiversity (b).

pueden ejercer una influencia más determinante sobre la producción que la sombra por sí sola. Durante las visitas de campo se observó que la Finca 2 presentaba un manejo nutricional más intensivo, lo cual podría favorecer mayores rendimientos independientemente de las condiciones de cobertura arbórea. De igual manera, la edad y condición fisiológica de los cafetos pueden modificar significativamente la capacidad productiva del cultivo, generando variaciones que no necesariamente responden a las características de la sombra.

El Cuadro 11 presenta ecuaciones lineales exploratorias derivadas de las asociaciones observadas entre las variables evaluadas. Estas relaciones deben interpretarse con cautela y únicamente dentro del contexto de las fincas estudiadas.

Estos hallazgos coinciden con estudios realizados en Costa Rica y otros países productores de café, donde

se ha documentado que la relación entre sombra y rendimiento no siempre es lineal. De Melo y Abarca [8], por ejemplo, reportaron mayores niveles de productividad en cafetales con coberturas de sombra entre 35 % y 47 %, mientras que otros estudios desarrollados en zonas cálidas de Costa Rica han encontrado rendimientos satisfactorios bajo coberturas que oscilan entre 20 % y 60 % [11], [37]. Lo anterior indica que la influencia de la sombra depende no solo de su cantidad, sino también de aspectos como la composición de especies arbóreas, la distribución espacial del dosel, las condiciones climáticas locales y el manejo agronómico aplicado.

Conclusiones

La cobertura de sombra promedio fue de 32 %, con una desviación estándar de 2% (32 ± 2 %). Ambas fincas evaluadas registran una buena densidad de plantas musáceas (380 ± 222 Ind ha^{-1}), seguida por árboles de servicio principalmente el poró y gravilea. Cabe destacar que los sistemas registran una baja densidad de árboles frutales y maderables. El 21% de los individuos se reportan en malas condiciones fitosanitarias, principalmente por prácticas de poda inadecuadas y también por la antigüedad de algunos árboles. Las afectaciones físicas fueron reportadas mayormente en los árboles de poró y gravilea. Ambas especies son propensas a la entrada de hongos y al desarrollo de infecciones. En cuanto a nutrición mineral del sistema, el nivel de pH promedio obtenido es de 4,80, el resto de los minerales se encuentran en los niveles óptimos para la producción de café. La evaluación del índice de manejo nutricional determinó que ambas fincas tienen un alto valor ($7 \leq x \leq 8$), la diferencia está en el indicador de calidad de hábitat, sobre todo con respecto a especies nativas y uso de agroquímicos.

Respecto a biodiversidad, la F2 registra la mayor cantidad de especies y familias, con un índice de Shannon de 1,60, esto a pesar de que presentó mayor intensidad en el uso de agroquímicos. Por otro lado, el sistema de la F1 está conformado solamente por poros y musáceas, por eso el índice de Shannon y el índice de biodiversidad es menor. En cuanto a carbono acumulado, la F1 acumuló la mayor cantidad de carbono con $1,55$ t ha^{-1} , de hecho, el aporte de las musáceas tuvo mucha influencia en el resultado. La cantidad promedio de biomasa arriba del suelo (BAS) de los sistemas evaluados fue de $2,29$ t ha^{-1} , con una desviación estándar de ± 1.76 t ha^{-1} .

Se observaron tendencias de asociación positiva entre el número de individuos y el carbono acumulado, así como entre el porcentaje de sombra y el índice

de biodiversidad. Sin embargo, debido al carácter exploratorio del estudio y al tamaño reducido de muestra, estas relaciones deben interpretarse con cautela.

Referencias

- [1] A. P. Wilson & N. L. W. Wilson, "The economics of quality in the specialty coffee industry: insights from the Cup of Excellence auction programs," *Agricultural Economics*, vol. 45, no. S1, Nov., pp. 91-105, 2014. <https://doi.org/10.1111/agec.12132>
- [2] International Coffee Organization, "Informe del Estado del Café 2018", 2018. [Online]. Disponible en: International Coffee Organization <https://www.ico.org/es/Market-Report-18-19-c.as> [Accedido: 15-jun-2026]
- [3] responsAbility Investments AG, (D. Díaz), "Costa Rica: How quality pays for coffee farmers. Case study ASOPROAAA", 2015. [Online]. Disponible en: responsAbility <https://www.responsability.com> [Accedido: 15-jun-2026].
- [4] Instituto del Café de Costa Rica, "Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica", Congreso Nacional Cafetalero Ordinario, 2017, pp. 1-50.
- [5] G. Detlefsen y E. Somarriba (Eds.), *Producción de madera en sistemas agroforestales de Centroamérica*. Turrialba, Costa Rica: CATIE, 2012.
- [6] E. De Melo, *Evaluación de los sistemas agroforestales con café en fincas vinculadas al consorcio de cooperativas de caficultores de Guanacaste y Montes de Oro (COOCAFE): Un aporte a la construcción de la sostenibilidad*. CATIE/Fundación Café Forestal/Consortio COOCAFE/Islas de Paz-VECO, 2005.
- [7] R. E. Jezeer, et al., "Benefits for multiple ecosystem services in Peruvian coffee agroforestry systems without reducing yield," *Ecosystem Services*, vol. 40, Dec., pp. 1-13, 2019. DOI: 10.1016/j.ecoser.2019.101033
- [8] E. De Melo y S. Abarca, *Cafetales para Servicios Ecosistémicos, con Énfasis en el Potencial de Sumideros de Carbono: El Caso de las Cooperativas Afiliadas a COOCAFE*, Costa Rica. CATIE-FUNCAFOR-COOCAFE-OIKOCREDIT, 2008.
- [9] C. R. Cerdan, et al., "Local knowledge of impacts of tree cover on ecosystem services in smallholder coffee production systems," *Agricultural Systems*, vol. 110, Jul., pp. 119-130, 2012.
- [10] F. Farfán, *Agroforestería y sistemas agroforestales con café*, Manizales, Colombia, Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2014.
- [11] F. Montagnini, et al., *Sistemas Agroforestales: Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales*. Serie Técnica No. 402, CATIE, Colombia y Costa Rica, 2015.
- [12] G. Fernández, "Propuesta de un diseño agroforestal con café (*Coffea arabica* L.) y manejo orgánico en la región de Monteverde, Costa Rica". Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2018.
- [13] O. Sánchez y G. Navarrete, "La experiencia de Costa Rica en el pago por servicios ambientales: 20 años de lecciones aprendidas," *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 51, no. 2, Jul., pp. 195-214, 2017. <http://dx.doi.org/10.15359/rca.51-2.11>
- [14] J. J. Serrano, et al., *Guía didáctica para la silvicultura de bosques secundarios y degradados de Centroamérica*. Serie Técnica, Manual Técnico N.º 144, CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2019.
- [15] J. Meléndez y M. Molina, *Fertilidad de suelos y manejo de la nutrición de cultivos en Costa Rica*. Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), Universidad de Costa Rica, 2002.
- [16] Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), *Guía para la toma de muestras de suelo y tejidos foliares para el diagnóstico de la fertilidad*. M. J. Elizondo Alvarado, Ed. San José, Costa Rica, 2019.
- [17] A. H. Mas y T. V. Dietsch, "An index of management intensity for coffee agroecosystems to evaluate butterfly species richness," *Ecological Applications*, vol. 13, no. 6, Oct., pp. 1491-1501, 2003. <https://doi.org/10.1890/01-5229>
- [18] E. Somarriba, et al., "Biodiversity conservation in neotropical coffee (*Coffea arabica*) plantations," en *Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes*, G. A. Schroth, G. Fonseca, C. Harvey, C. Gascon, H. L. Vasconcelos y A. M. N. Izac, Eds. Washington, DC: Island Press, 2004, pp. 198-220.
- [19] J. Alvis, "Análisis estructural de un bosque natural localizado en zona rural del municipio de Popayán," *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 7, no. 1, Jun., pp. 115-122, 2009.
- [20] L. Villavicencio y J. I. Valdez, "Análisis de la estructura arbórea del sistema agroforestal rusticano de café en San Miguel, Veracruz, México," *Agrociencia*, vol. 37, no. 4, pp. 413-423, 2003
- [21] B. Medina, et al., *Metodología para la evaluación de servicios ambientales*. Guatemala: Anacafé y Foreign and Commonwealth Office, 2006.

- [22] Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Propuesta de metodología para la evaluación de servicios ambientales. Turrialba, Costa Rica, 2008.
- [23] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4—Agriculture, Forestry and Other Land Use. Geneva, Switzerland, 2006.
- [24] D. Castillo-Figueroa, et al., "Above-ground biomass and carbon stock estimation in tropical agroforestry systems," Carbon Balance and Management, vol. 16, no. 23, pp. 1-15, 2021.
- [25] R. Jiménez, "Evaluación de la productividad en sistemas agroforestales de café bajo sombra". Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica, 2019.
- [26] O. Ovalle, Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales con café en Costa Rica, informe técnico, MAG-NAMA Café-CIAT-CGIAR, San José, Costa Rica, 2016.
- [27] Oficina Nacional Forestal (ONF), Guía técnica SAF para la implementación de sistemas agroforestales (DAF) con árboles forestales maderables. Heredia, Costa Rica: EuroDigital Comunicación, 2013, 33 pp.
- [28] R. M. Chaves, et al., "Seasonal changes in photoprotective mechanisms of leaves from shaded and unshaded field-grown coffee (*Coffea arabica* L.) trees," Trees, vol. 22, Dec., pp. 351-361, 2008.
- [29] S. Jansen, et al., "Another species of *Quadrastichus* (Hymenoptera: Eulophidae: Tetrastichinae) attacking *Erythrina* (Fabaceae) in the Neotropics: a report from Costa Rica," International Journal of Tropical Insect Science, vol. 39, May., pp. 243-247, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42690-019-00026-5>
- [30] R. Villareyna, Efecto de los árboles de sombra sobre el rendimiento de los cafetos basado en perfiles de daño. Informe final, Proyecto Cascada, CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2016.
- [31] V. E. Osorio, "Descomposición y liberación de nitrógeno foliar y radicular de siete especies de sombra en un sistema agroforestal con café," Tesis de maestría, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica, 2004.
- [32] J. Silva, et al., "Relationship between coffee leaf analysis and soil chemical analysis," Revista Brasileira de Ciência do Solo, Vol. 42, Dec., pp. 1-13, 2018.
- [33] L. F. Monge, "Manejo de la nutrición y fertilización del cultivo de café orgánico en Costa Rica," en XI Congreso Nacional Agronómico / III Congreso Nacional de Suelos, 1999, pp. 177-191.
- [34] S. Laurance, "Landscape connectivity and biological corridors," en Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes, G. A. Schroth, G. Fonseca, C. Harvey, C. Gascon, H. L. Vasconcelos y A. M. N. Izac, Eds. Washington, DC, EE. UU.: Island Press, 2004, pp. 198-220.
- [35] D. A. Suárez, "Cuantificación y valoración económica del servicio ambiental almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café en la Comarca Yassica Sur, Matagalpa, Nicaragua," Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica, 2002.
- [36] J. A. Di Rienzo, et al., Estadística para las ciencias agropecuarias, 6.ª ed., Córdoba, Argentina, Editorial Brujas 2005, 347 pp.
- [37] R. Muschler, Árboles en cafetales, Módulo de Enseñanza Agroforestal, n.º 5. Turrialba, Costa Rica: Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ, 1999, 139 pp.
- [38] N. Franck y P. Vaast, "Limitation of coffee leaf photosynthesis by stomatal conductance and light availability under different shade levels," Trees, vol. 23, n.º 4, pp. 761-769, 2009.