

Short Note [Nota Corta]



CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL EN UN SISTEMA SILVOPASTORIL EN
LA REGIÓN FRAILESCA DE CHIAPAS, MÉXICO †

[ENVIRONMENTAL CHARACTERIZATION IN A SILVOPASTORAL
SYSTEM IN THE FRAILESCA REGION OF CHIAPAS, MEXICO]

César Iván Vázquez-Ramos, Miguel Ángel Salas-Marina,
Wel Olveín Cruz-Macias and Luis Alfredo Rodríguez-Larramendi*

Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Facultad de Ingeniería, Sede Villa
Corzo. Carretera Villa Corzo-Monterrey, Km 3.0. Villa Corzo, Chiapas. México.

Email: cesar.vazquez@e.unicach.mx, alfredo.rodriguez@unicach.mx*,
miguel.salas@unicach.mx, wel.cruz@unicach.mx

*Corresponding author

SUMMARY

Background. The presence of the tree component above the herbaceous stratum in a silvopastoral system changes the microclimate, with implications for pasture growth. **Objective.** To compare the conditions generated in the microclimate of a silvopastoral system composed of hybrid *Brachiaria sp.* grass cv. CIAT BRO2/1752, under scattered trees and full sun exposure. **Methodology.** An experimental procedure was followed under field conditions in two experimental variants: pasture grown in full sun and pasture grown under shade of scattered trees from July 2022 to February 2023. Microclimatic variables were evaluated: diurnal air temperature, relative humidity, photosynthetically active radiation, soil moisture, soil temperature and vapor pressure deficit. **Results.** The dispersed trees attenuated 85% of the incident solar radiation, while in full sun there was an increase of 1.1 °C in air temperature compared to the variant under dispersed trees. There were no significant differences in relative air humidity. Soil moisture was 5.6% higher in full sun and vapor pressure deficit was lower in full sun. **Implications.** The environmental differences observed, in *Brachiaria* grassland under scattered trees or in full sun, open new questions about their effect on pasture physiology, animal behavior or soil microflora. **Conclusions.** Scattered trees in a silvopastoral system modify the microclimate by attenuating the intensity of PAR and decreasing air temperature. Nevertheless, higher soil moisture values are maintained in full sun than under tree shade.

Key words: solar radiation; Temperature; *Brachiaria sp.*; Agroforestry.

RESUMEN

Antecedentes. La presencia del componente arbóreo sobre el estrato herbáceo en un sistema silvopastoril modifica el microclima, con implicaciones en el crecimiento de los pastos. **Objetivo.** Comparar las condiciones generadas en el microclima de un sistema silvopastoril compuesto por pasto *Brachiaria* híbrido cv. CIAT BRO2/1752, bajo árboles dispersos y a plena exposición solar. **Metodología.** Se siguió un procedimiento experimental en condiciones de campo en dos variantes experimentales: pasto crecido a pleno sol y pasto crecido bajo sombra de árboles dispersos desde julio 2022 a febrero 2023. Se evaluaron las variables microclimáticas: temperatura diurna del air, humedad relativa, radiación fotosintéticamente activa, humedad del suelo, temperatura del suelo y déficit de presión de vapor. **Resultados.** Los árboles dispersos atenuaron 85% de la radiación solar incidente, mientras que a pleno sol se registraron incrementos de 1.1 °C de la temperatura del aire en comparación con la variante bajo árboles dispersos. No se registraron diferencias significativas en la humedad relativa del aire. La humedad del suelo fue 5.6% mayor a pleno sol y el déficit de presión de vapor fue menor a plena exposición solar. **Implicaciones.** Las diferencias ambientales observadas, en la pradera de *Brachiaria* bajo árboles dispersos o a pleno sol, abren nuevas interrogantes sobre su efecto en la fisiología de los pastos, el comportamiento animal o la microflora del suelo. **Conclusiones.** Los árboles dispersos en un sistema silvopastoril modifican el microclima atenuando la intensidad de la RFA y disminuyendo la temperatura del aire. No obstante, a pleno sol se mantienen valores de humedad del suelo superiores que bajo la sombra de los árboles.

Palabras clave: Radiación solar; Temperatura; *Brachiaria sp.*; Agroforestería.

† Submitted August 18, 2024 – Accepted April 24, 2025. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5805>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = C.I. Vázquez-Ramos: <https://orcid.org/0009-0006-6933-553X>; M.A. Salas Marina: <https://orcid.org/0000-0002-4737-2069>; W.O. Cruz-Macias: <https://orcid.org/0000-0003-0472-8755>; L.A. Rodríguez-Larramendi: <https://orcid.org/0000-0001-8805-7180>

INTRODUCCIÓN

Los sistemas agroforestales (SAF), de acuerdo con Castle *et al.* (2022), permiten una integración sostenible de árboles, cultivos y/o ganado, promoviendo la resiliencia agrícola y la producción de múltiples productos agrícolas y forestales. Como parte de los SAF, los sistemas silvopastoriles (SSP) son sistemas agropecuarios que combinan la producción de bienes con la provisión de servicios ecosistémicos integrando de manera armoniosa animales, pastizales y árboles en un mismo espacio productivo (Schinato *et al.*, 2023). Al incrementar la presencia de árboles bajo diferentes arreglos espaciales se producen beneficios, se mejoran y rescata la capacidad productiva de los ecosistemas, contrarrestando los efectos adversos del clima sobre los animales (dos Santos *et al.*, 2022), a la vez que se atenúan los efectos de las altas temperaturas sobre los cultivos asociados, debido a la regulación que ejercen los árboles sobre el microclima. La presencia de árboles para proporcionar sombra en estos sistemas mejora el microclima al reducir la temperatura y aumentar el confort térmico del ganado. Estos resultados indican que los árboles en sistemas agroforestales pueden ser una estrategia efectiva para mitigar el estrés por calor, mejorar el bienestar animal y aumentar la productividad en climas cálidos (Pezzopane *et al.*, 2019).

Dentro de los SAF, se destacan los SSP, ya sea bajo un arreglo específico de árboles y pastos o simplemente la disposición aleatoria de árboles dispersos en el pastizal. Algunos reportes indican que, en estos sistemas, la sombra de los árboles influye en la producción del estrato herbáceo (Peri, 2016). La cantidad de radiación fotosintéticamente activa (RFA) disponible para el estrato herbáceo en un SSP, es el factor más decisivo para su sostenibilidad (Mayer *et al.*, 2002, Karvatté *et al.*, 2016). Dado que el componente arbóreo genera cambios en la temperatura del aire, a mayor densidad arbórea ocurre una disminución en la amplitud térmica, atenuando las temperaturas extremas en temporada de estiaje y mayores en meses fríos (Munka, 2017).

En este sentido, Lucero-Ignamarca *et al.*, (2019) mencionan que el efecto de los árboles sobre la pradera depende de varios factores y de cómo estos se interrelacionan entre sí. Entre estos factores se pueden mencionar las características ecofisiológicas de los árboles y los pastos, las rutas metabólicas de la fotosíntesis de las especies utilizadas y la disponibilidad de luz, agua y nutrientes, entre otros. Y por otra parte, los efectos de los árboles sobre los cultivos y pastos en sistemas agroforestales dependen de una compleja interacción entre los factores fisiológicos y ambientales. Factores como la luz, el agua, los nutrientes y las características ecofisiológicas de los árboles y los pastos juegan un papel crucial en

la productividad y sostenibilidad del sistema. Además, los árboles pueden competir con los pastos por estos recursos, pero también pueden mejorar la disponibilidad de nutrientes a través de la fijación de nitrógeno y la redistribución del agua, lo que permite un mejor crecimiento de los pastos bajo ciertas condiciones (Jose *et al.*, 2004).

Entre los efectos que produce la cobertura de árboles dispersos en SSP se pueden mencionar la atenuación de la radiación fotosintéticamente activa (RFA), la modificación de los regímenes de temperatura del aire (TA) y humedad relativa (HR), así como efectos en la humedad (HS) y temperatura del suelo (TS). En estudios realizados en Chile por Lucero-Ignamarca *et al.* (2019) se encontró que diferentes arreglos espaciales con árboles de *Acacia caven*, la HR resultó ser mayor en el tratamiento de mayor cobertura arbórea, lo que puede asociarse con un efecto favorable por la presencia de árboles, en comparación con el tratamiento sin árboles.

La HS y la TA, son variables del microclima que se modifican con la presencia de árboles de sombra. En plantaciones de cafetos al sol y bajo sombra se encontró que la HS aumentó bajo el efecto de los árboles de sombra, mientras que los valores medios de la TA con frecuencia sobrepasan los 24° C, principalmente al sol y no se registraron valores del déficit de presión de vapor (DPV) superiores a 1.5 kPa (Velasco *et al.*, 2001).

A pesar de que la ganadería en México es una de las actividades agropecuarias más importantes del país, la información sobre el efecto de los árboles dispersos en el microclima en un SSP es escasa, aunque en Brasil, son diversos los estudios que demuestran que el uso de árboles en hileras reduce significativamente el estrés térmico en el ganado, mejorando su bienestar y productividad en regiones cálidas (Giro *et al.*, 2019), es necesario continuar profundizando en los efectos que ejercen los árboles dispersos en el microclima de un SSP. Es por ello que el objetivo del trabajo fue la comparar las modificaciones en el microclima en un sistema silvopastoril bajo árboles dispersos en comparación con el pasto CAYMAN (*Brachiaria sp.* híbrido cv. CIAT BRO2/1752) a plena exposición solar.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en un sitio ubicado en el rancho ganadero de la colonia Valle Morelos del Municipio Villa Corzo, de la región Frailesca, Chiapas, México, a una altitud de 560 metros sobre el nivel del mar, de topografía plana, con árboles dispersos de forma natural. La siembra del pasto CAYMAN (*Brachiaria sp.* híbrido cv. CIAT BRO2/1752) de nueva introducción en la región se realizó en junio de

2022. El área de estudio cuenta con un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, con temperatura media anual de entre 14-26 °C.

Diseño experimental

En un potrero de una hectárea de superficie compuesto por árboles dispersos de manera natural, se delimitaron cinco parcelas bajo la sombra de los árboles dispersos y cinco a pleno sol. Los árboles de sombra predominantes fueron de las especies *Guazuma ulmifolia* Lam, *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., *Poeppigia procera* (Poepp. ex Spreng.) y *Calycohyllum candidissimum* (Vahl) DC., plantados a una densidad de 160 árboles por ha, con promedio de edad de 16 años, 8 m de diámetro de la copa y 48 cm de diámetro normal. El pasto se estableció en junio de 2022 a una densidad de 8 kg de semillas por hectárea

para suplir las necesidades de un pasto de mayor productividad y resistente a la humedad (Tropical Seeds LLC., n.d.), característica del sitio en época de primavera. Los puntos de muestreo estuvieron compuestos por 10 parcelas de 3 x 3 m (cinco en cada variante experimental), dispuestas al azar debajo de los árboles dispersos y a plena exposición solar (Figura 1). Las parcelas estuvieron separadas a 20 metros aproximadamente una de otra, en dependencia de la distribución de los árboles de sombra.

Variables evaluadas

En cada parcela, durante dos días consecutivos de cada mes, se registraron los valores diurnos de la densidad de flujo fotónico fotosintético (RFA, 400-700 nm), HR (%), TA y TS (°C), HS (%) y DPV.

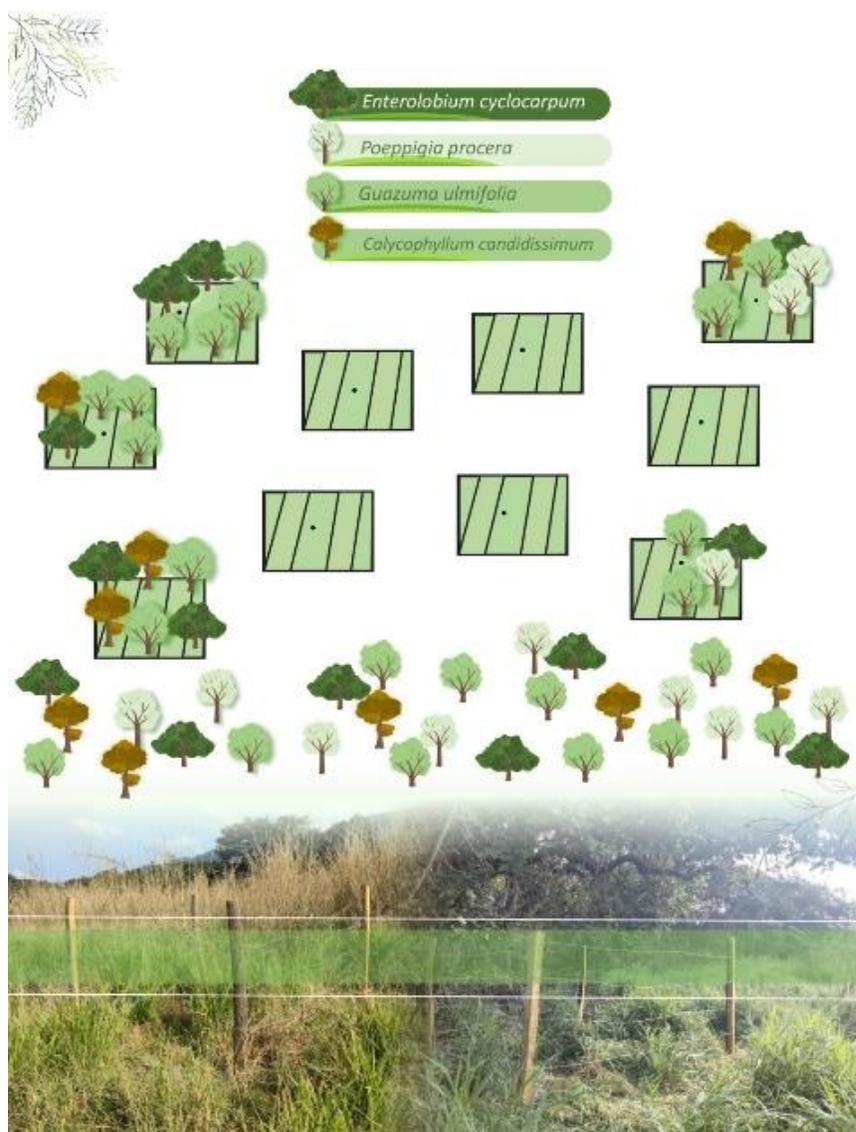


Figura 1. Distribución de las parcelas (puntos de muestreos) dentro del sistema silvopastoril.

Densidad del flujo fotónico fotosintético

Para determinar la RFA ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en el rango de 400-700 nm, se realizaron las mediciones desde las 6:00 hasta las 17:00 horas, a intervalos de 30 minutos. Se utilizó un Sensor Quantum Flux, Modelo MQ-500, Apogee Instruments®, colocándose en el centro de la parcela a un metro por encima del nivel del suelo. Como se contaba con un solo equipo, el sensor se movió de una parcela a otra, realizando todos los registros de una variante en un lapso de tiempo de 5 minutos. Para registrar la RFA a plena exposición solar el sensor se colocó en el centro de las parcelas expuestas evitando el efecto de la sombra proyectada por los árboles. Los registros diarios fueron promediados para contar con un dato por cada parcela o punto de muestreo ($n=5$).

Humedad relativa y temperatura del aire

Los datos de TA ($^{\circ}\text{C}$) y HR (%) se registraron tres días consecutivos de cada mes desde las 06:00 hasta las 17:00 horas a intervalos de 30 minutos. Se colocó una microestación climática WatchDog® con sensores de TA y HR integrados, en el centro de cada bloque por cada variante experimental a una altura de un metro por encima del nivel del suelo. Al igual que para el registro de la RFA, se movió la micro estación para realizar los registros en cada parcela, cuidando siempre de no alterar el intervalo de mediciones. Los registros diarios fueron promediados para contar con un dato por cada parcela o punto de muestreo ($n=5$).

Déficit de presión de vapor

El DPV se calculó con los registros de TA y HR a través de la siguiente fórmula:

$$\text{DPV} = e_s \cdot (100 - \text{HR}) / 100 \quad (1)$$

Donde la HR es la humedad relativa del aire, e_s es la presión de vapor de agua a saturación a una temperatura del aire dada

Donde:

$$e_s = 0.6108 \cdot \exp\left(\frac{17.27 T}{T + 2373}\right) \quad (2)$$

T es la temperatura diurna del aire

Humedad y temperatura del suelo

En el centro de cada bloque, a 1.5 m de distancia del tronco de los árboles de sombra y a una profundidad de 20 cm se colocó el sensor de un medidor de TS y HS (ProCheck®). Los registros en la variante expuesta a plena exposición solar se realizaron a la misma profundidad en el centro de cada parcela. Los registros

se realizaron desde las 06:00 hasta las 17:00 horas a intervalos de 30 minutos durante tres días de cada mes. Para realizar los registros en cada parcela se trasladó el ProCheck® a cada parcela, cuidando siempre de no alterar el intervalo de mediciones. Los registros diarios fueron promediados para contar con un dato por cada parcela o punto de muestreo ($n=5$).

Análisis estadístico

Para evaluar las diferencias en las variables microclimáticas entre los dos ambientes experimentales (Pleno sol vs Bajo árboles dispersos), se utilizaron modelos lineales mixtos (LMM) que consideran a la variable ambiente como efecto fijo y al mes como efecto aleatorio, con el fin de incorporar la estructura de observaciones repetidas en el tiempo. Estos modelos se ajustaron por separado para cada variable dependiente (RFA, TA, HR, HS, TS y DPV).

Para verificar el cumplimiento del supuesto de normalidad de los residuos, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk. En general, los residuos de los modelos cumplieron con la normalidad, excepto en el caso de RFA y TS. Para la temperatura del suelo (TS), se aplicó una transformación logarítmica (log-TS), la cual mejoró la distribución de los residuos ($p = 0.1150$). El análisis posterior con esta transformación mantuvo la significancia estadística del efecto del ambiente ($p < 0.001$), lo que respalda la robustez de los resultados obtenidos.

Para la variable RFA (densidad del flujo fotónico fotosintético), se evaluó la normalidad de los residuos del modelo mediante la prueba de Shapiro-Wilk y gráficos QQ-plot. Si bien se detectó una desviación significativa respecto a la normalidad ($p = 0.0150$), las transformaciones más comunes (logarítmica y raíz cuadrada) no mejoraron la distribución de los residuos, manteniéndose fuera del umbral deseado ($p > 0.05$). No obstante, se optó por mantener el análisis con los valores originales debido a que los modelos lineales mixtos (LMM) son estadísticamente robustos frente a violaciones leves del supuesto de normalidad, especialmente en estudios con diseño balanceado y número moderado de observaciones (Schielzeth et al., 2020; Zuur et al., 2009). Además, los residuos no mostraron patrones preocupantes de heterocedasticidad y el modelo presentó buena capacidad de ajuste. Esta decisión se justifica con base en criterios metodológicos ampliamente aceptados para el análisis de datos ecológicos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los análisis de suelo mostraron diferencias significativas en las propiedades químicas y físicas entre las variantes experimentales a pleno sol y bajo árboles dispersos (Tablas 1 y 2). El suelo bajo árboles

dispersos presentó un contenido de materia orgánica (MO) superior al registrado a pleno sol. Esta diferencia puede atribuirse a la mayor acumulación de hojarasca y menor tasa de oxidación de la MO bajo la cobertura arbórea, lo que coincide con estudios previos que destacan la capacidad de los sistemas agroforestales para mejorar la calidad del suelo mediante el aporte continuo de residuos orgánicos (Jose, 2009; O'Conner *et al.*, 2023).

En cuanto a los macronutrientes, los niveles de fósforo disponible fueron bajos en ambas variantes. Estas concentraciones indican una limitación de este elemento, común en suelos tropicales, especialmente aquellos con alta concentración de óxidos de hierro y aluminio que inmovilizan este nutriente (Palm *et al.*, 2001). El contenido de potasio también fue bajo en ambos casos, sin diferencias notables entre las variantes experimentales. Por otro lado, los niveles de calcio y magnesio fueron menores bajo árboles dispersos en comparación con pleno sol. Esto podría deberse a una mayor lixiviación de cationes en suelos sombreados o una mayor absorción por parte de raíces profundas de los árboles (Sileshi *et al.*, 2007).

En relación con los micronutrientes, el zinc mostró un contenido significativamente mayor a pleno sol en comparación con el suelo bajo árboles dispersos, mientras que el manganeso presentó una tendencia opuesta, con mayores niveles bajo los árboles dispersos. Estas variaciones pueden estar relacionadas con las diferencias en la dinámica de disponibilidad de nutrientes influenciada por la cobertura vegetal y el microclima del suelo (O'Conner *et al.*, 2023). El cobre mostró una mayor concentración a pleno sol que bajo árboles dispersos, mientras que el boro fue consistentemente bajo en ambas variantes, indicando una deficiencia generalizada de este nutriente en el sistema.

Las propiedades físicas del suelo también reflejaron diferencias importantes (Tabla 2). La capacidad de campo fue mayor bajo árboles dispersos en comparación con pleno sol, al igual que el punto de saturación. Esto sugiere que los suelos bajo árboles tienen una mayor capacidad para retener agua, posiblemente debido a su mayor contenido de MO y menor compactación, lo que mejora la estructura del suelo y favorece la porosidad (Pagliai *et al.*, 2004). De manera similar, el punto de marchitez permanente fue más alto bajo árboles dispersos que a pleno sol, lo que indica que el agua retenida está disponible para las plantas durante períodos más largos.

La conductividad hidráulica fue sustancialmente mayor bajo árboles dispersos en comparación con a pleno sol, destacando una mejor infiltración de agua en los suelos sombreados (Tabla 2). Esta diferencia puede atribuirse a una menor compactación del suelo, promovida por las raíces de los árboles y el aporte de materia orgánica (Jose, 2009). Además, la densidad aparente fue ligeramente menor bajo los árboles, lo que refuerza la hipótesis de una mejor estructura del suelo en esta variante.

El pH del suelo se mantuvo en un rango moderadamente ácido en ambas variantes, aunque fue ligeramente menor bajo árboles dispersos. Esto podría estar relacionado con una mayor actividad microbiana y la acumulación de materia orgánica, que liberan ácidos orgánicos en el suelo (Sileshi *et al.*, 2007).

En conjunto, estos resultados destacan las ventajas de los SSP con árboles dispersos para mejorar la calidad del suelo, especialmente en términos de retención de agua, estructura y contenido de materia orgánica. Sin embargo, las deficiencias de nutrientes, como fósforo, potasio y boro, representan limitaciones importantes que deben abordarse mediante estrategias de manejo como la fertilización complementaria (Fageria *et al.*, 2011).

Tabla 1. Propiedades químicas del suelo en ambas variantes experimentales.

| Variante experimental | MO (%) | P (Bray) | K | Ca | Mg | Na | Fe | Zn | Mn | Cu | B | Al | S |
|-----------------------|--------|----------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| | | | | | | | ppm | | | | | | |
| Pleno sol | 1.2 | 4.30 | 51.70 | 537.00 | 236.00 | 51.90 | 91.90 | 77.40 | 4.64 | 0.83 | 0.13 | 3.63 | 0.10 |
| Árboles dispersos | 1.93 | 4.07 | 51.40 | 500.00 | 183.00 | 25.00 | 97.90 | 15.70 | 11.80 | 0.48 | 0.15 | 8.26 | 0.10 |

Tabla 2. Propiedades físicas del suelo en ambas variantes experimentales.

| Variante experimental | Punto de saturación (%) | Capacidad de campo (%) | Punto de marchitez permanente (%) | Conductividad hidráulica (cm/h) | Densidad aparente (g/cm ³) | pH |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|--|------|
| Pleno sol | 25.2 | 13.2 | 7.85 | 0.10 | 1.38 | 6.48 |
| Árboles dispersos | 31.00 | 16.4 | 9.76 | 6.00 | 1.33 | 6.12 |

La densidad del flujo fotónico fotosintético (RFA) fue significativamente mayor a pleno sol en comparación con bajo sombra de árboles dispersos ($p < 0.001$) (Tabla 3), lo cual confirma que el componente arbóreo atenuó hasta el 85% de la radiación incidente. Este efecto ha sido documentado por Macedo-Pezzopane *et al.* (2015) y Gómez (2004), quienes reportaron reducciones similares en la RFA bajo sombra de árboles en sistemas agroforestales.

En cuanto a la temperatura del aire (TA), los valores también fueron significativamente mayores a pleno sol respecto a la sombra ($p < 0.001$), en concordancia con lo reportado en SSP por Britto-Ferreira (2010) y Tajuddin (1986), quienes indicaron diferencias de hasta 3.5 °C. Este resultado respalda el papel regulador del dosel arbóreo en la atenuación de temperaturas extremas (Lisnawati *et al.*, 2017).

La humedad relativa (HR) del aire fue menor a pleno sol en comparación con árboles dispersos ($p < 0.001$), aunque con diferencias poco relevantes en términos fisiológicos. Este resultado coincide con de Souza *et al.* (2010), quienes encontraron escasa variabilidad en HR asociada a sombra arbórea, salvo en horas específicas del día.

La humedad del suelo (HS) mostró valores significativamente mayores a pleno sol frente a árboles dispersos ($p < 0.001$), lo cual ha sido interpretado como resultado de la competencia radical entre árboles y pastos, la interceptación de la lluvia por el dosel, y la redistribución vertical del agua (Muñoz-Villers *et al.*, 2020; Peri *et al.*, 2016). La temperatura del suelo (TS), tras ser transformada logarítmicamente para cumplir los supuestos de normalidad, fue significativamente superior a pleno sol ($p < 0.001$). La transformación permitió estabilizar la varianza y validar la robustez del resultado, tal como recomiendan Pagliai *et al.* (2004) para datos edáficos bajo distintos manejos.

Finalmente, el déficit de presión de vapor (DPV)

también fue significativamente mayor a pleno sol que bajo sombra ($p < 0.001$), lo que sugiere mayor demanda evaporativa en condiciones de exposición directa, en coincidencia con López *et al.* (2009) y Zhang *et al.* (2024).

Los hallazgos aquí mostrados en el incremento de la HS a pleno sol (Tabla 3) han sido objeto de debate en otras investigaciones y fueron reportados con anterioridad en condiciones experimentales en un agroecosistema cafetalero al sol y bajo sombra por Velasco *et al.* (2001). Estos autores encontraron que la HS en los cafetos expuestos fue mayor a pleno sol y plantean tres posibles hipótesis relacionadas con la capacidad de interceptación de la lluvia por los árboles sombreadores, el efecto del rocío en las plantaciones cultivadas a pleno sol y la absorción de agua por las raíces de los árboles de sombra que provoca un gradiente de humedad en el suelo induciendo la disminución de la humedad en las capas superiores del suelo. Los argumentos presentados por Muñoz-Villers *et al.* (2020) ofrecen información más actual y valiosa sobre las posibles causas del régimen hídrico en el suelo dentro de un SAF de café. Los autores demuestran que tanto los cafetos como los árboles de sombra tienen un uso complementario del agua disponible, el cual varía según las estaciones del año. Dada la complejidad de la dinámica del agua en el suelo en sistemas que integran cultivos con árboles de sombra, y en particular en SSP, es necesario continuar con estas investigaciones para identificar las causas del régimen hídrico y su impacto en los cultivos asociados a dichos sistemas.

Se ha comprobado que el componente arbóreo y los pastos compiten por la humedad disponible en el suelo ocasionando que a plena exposición solar la HS sea mayor (Peri *et al.*, 2016). A su vez, en casos de sequía extrema, la presencia del componente arbóreo reduce la evapotranspiración de los cultivos en el sotobosque, debido a la disminución de la temperatura y de la velocidad del viento, a pesar de esto se beneficia el

Tabla 3. Medias generales de las variables climáticas en un sistema silvopastoril comuesto por árboles dispersos y pasto *Brachiaria sp.*

| Variables | Media Árboles dispersos | Media Pleno sol | p-valor |
|--|-------------------------|----------------------|---------|
| DPV (kPa) | 0.74 ± 0.033 | 0.79 ± 0.035 | < 0.01 |
| HR (%) | 68.02 ± 1.23 | 67.30 ± 1.28 | < 0.01 |
| HS (%) | 30.18 ± 2.77 | 34.93 ± 2.99 | < 0.01 |
| RFA ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) | 141.09 ± 16.80 | 944.09 ± 43.78 | < 0.01 |
| TA (°C) | 27.53 ± 0.31 | 28.63 ± 0.33 | < 0.01 |
| TS (°C) | 22.91 ± 0.38 (3.092) | 24.36 ± 0.33 (3.150) | < 0.01 |

Nota: Para TS, se muestran las medias y errores estándar originales seguidos entre paréntesis por los valores transformados (log) utilizados en el modelo estadístico. Esta presentación permite una mejor interpretación fisiológica sin comprometer la validez estadística del análisis (Shapiro-Wilk $p = 0.1150$).

Los valores transformados se presentan entre paréntesis.

EE: error estándar de la media.

desarrollo del forraje en el sistema (Peri *et al.*, 2016). De igual forma otro punto importante de la HS, es la influencia en las propiedades físicas del suelo, como el punto de saturación, ya que este depende de la materia orgánica, el tipo y cantidad de arcilla.

En cuanto a las variaciones observadas en el DPV, Zhang *et al.* (2024) destacaron recientemente que el DPV elevado, combinado con el déficit de HS, puede llevar a una reducción significativa en la eficiencia del uso de la luz y, por lo tanto, en la producción de biomasa en pastizales. Sin embargo, nuestros resultados difieren de López *et al.* (2009) quienes mencionan que el DPV a plena exposición solar superó los 3.5 kP al medio día, y esto afecta el potencial hídrico foliar y la apertura de las estomas, limitando la transpiración.

Los resultados encontrados en esta investigación abren nuevas interrogantes para futuras investigaciones relacionadas con las implicaciones fisiológicas de los cambios producidos en el microclima sobre los pastos, la microbiología del suelo, así como el comportamiento animal en SSP.

CONCLUSIONES

El ambiente bajo árboles dispersos redujo significativamente la radiación fotosintéticamente activa (RFA), lo que constituye una forma efectiva de amortiguamiento lumínico, disminuyendo hasta en un 85% la radiación incidente.

La temperatura del aire (TA) fue significativamente más baja bajo sombra, confirmando el efecto moderador del dosel arbóreo sobre la carga térmica. Este microclima más fresco puede mitigar el estrés térmico en plantas y animales. Aunque las diferencias en humedad relativa (HR) fueron pequeñas, el déficit de presión de vapor (DPV) fue menor bajo sombra, indicando un ambiente menos demandante en términos evaporativos, lo cual puede mejorar la eficiencia fisiológica de las plantas.

La humedad del suelo (HS) fue significativamente mayor a pleno sol, probablemente por menor competencia radical y mayor infiltración directa. Estos hallazgos confirman la influencia del componente arbóreo sobre la dinámica hídrica del sistema.

La temperatura del suelo (TS), tras ser transformada logarítmicamente para cumplir con los supuestos estadísticos de normalidad, mostró diferencias significativas, siendo mayor en el ambiente de pleno sol.

En conjunto, los árboles dispersos modifican el ambiente microclimático de forma significativa, generando condiciones más estables y atenuadas. Estas

modificaciones sugieren que los SSP con cobertura arbórea pueden constituir una estrategia efectiva para la adaptación agroecológica al cambio climático, favoreciendo tanto la sostenibilidad productiva como el bienestar animal y vegetal en regiones tropicales.

Funding. The article is the result of research conducted through a CONAHCYT grant (2022-000002-01NACF) for graduate studies to the first author of this research.

Conflict of interest statement. There are no conflicts of interest.

Compliance with ethical standards. The research did not include studies in human beings; therefore, it was not required to submit it to revisions for verification of compliance.

Data availability. Data available upon reasonable request to the authors.

Author Contribution Statement (CRediT). **L.A. Rodríguez-Larramendi** – Conceptualization, methodology, validation, investigation, review and editing, project administration. **C.I. Vázquez-Ramos** – Methodology, investigation, writing original draft preparation, review and editing, formal analysis. **M.A. Salas-Marina** – Formal analysis, writing review and editing, visualization. **W.O. Cruz-Macias** – Investigation, preparation, data curation, writing review and editing, visualization. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

REFERENCES

- Andrade, F.H., Abbate, P.E., Otegui, M.E., Cirilo, A.G. and Cerrudo, A., 2010. Ecophysiological basis for crop management. *The Americas Journal of Plant Science & Biotechnology*, 4, pp. 23–34.
- Asitoakor, B.K., Vaast, P., Ræbild, A., Ravn, H.P., Eziah, V.Y., Owusu, K., Mensah, E.O. and Asare, R., 2022. Selected shade tree species improved cocoa yields in low-input agroforestry systems in Ghana. *Agricultural Systems*, 202, p. 103476. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103476>
- Bahamonde, H.A., Peri, P.L., Martínez Pastur, G. and Lencinas, M.V., 2009. Variaciones microclimáticas en bosques primarios y bajo uso silvopastoril de *Nothofagus antarctica* en dos clases de sitio en Patagonia Sur. In: *Actas Primer Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles*, Posadas, Misiones, Argentina.

- Britto-Ferreira, L., 2010. Respostas fisiológicas e comportamentais de bovinos submetidos a diferentes ofertas de sombra. M.Sc. Dissertation, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.
- Castle, S.E., Miller, D.C., Merten, N., Ordonez, P.J. and Baylis, K., 2022. Evidence for the impacts of agroforestry on ecosystem services and human well-being in high-income countries: A systematic map. *Environmental Evidence*, 11(1), p. 10. <https://doi.org/10.1186/s13750-022-00260-4>
- de Souza, W., Barbosa, O.R., Marques, J.A., Costa, M.A.T., Gasparino, E. and Limberger, E., 2010. Microclimate in silvipastoral systems with eucalyptus in rank with different heights. *Revista Brasileira Zootecnia*, 39(3), pp. 685–694. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010000300030>
- dos Santos, Neto, C.F., da Silva, R.G. and Maranhão, S.R., 2022. Microclimate and animal thermal comfort indexes in different silvipastoral system arrangements in Caatinga. *International Journal of Biometeorology*, 66, pp. 449–456. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02182-1>
- Elías, F. and Castellvi, F., 2001. *Agrometeorología*. 2nd ed. Madrid: Mundi-Prensa.
- Fageria, N.K., Baligar, V.C. and Jones, C.A., 2011. *Growth and Mineral Nutrition of Field Crops*. CRC Press.
- Feldhake, C.M. and Belesky, D.P., 2009. Photosynthetically active radiation use efficiency of *Dactylis glomerata* and *Schedonorus phoenix* along a hardwood tree-induced light gradient. *Agroforestry Systems*, 75, pp. 189–196. <https://doi.org/10.1007/s10457-008-9175-9>
- Giro, A., Pezzopane, J.R.M., Barioni Junior, W., de Pedroso, A.F., Lemes, A.P., Botta, D. and Garcia, A.R., 2019. Behavior and body surface temperature of beef cattle in integrated crop-livestock systems with or without tree shading. *Science of the Total Environment*, 684, pp. 587–596. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.377>
- Gómez, V., 2004. Cubiertas forestales y respuesta microclimática. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, Fuera de serie, pp. 84–100.
- Hanisch, A.L. and Pinotti, L.C.A., 2024. Co-creating strategies to optimize traditional silvopastoral systems through the management of native trees in Caívas in southern Brazil. *Conservation*, 4(1), pp. 65–81. <https://doi.org/10.3390/conservation4010005>
- Jose, S., 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, 76(1), pp. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
- Jose, S., Gillespie, A.R. and Pallardy, S.G., 2004. Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems*, 61(3), pp. 237–255. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029002.85273.9b>
- Karvatte, N., Klosowski, E.S., Almeida, R.G., Mesquita, E.E., Oliveira, C.C. and Alves, F.V., 2016. Shading effect on microclimate and thermal comfort indexes in integrated crop-livestock-forest systems in the Brazilian Midwest. *International Journal of Biometeorology*, 60(12), pp. 1933–1941. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1180-5>
- Lin, C.H., McGraw, M.L., George, M.F. and Garret, H.E., 2001. Nutritive quality and morphological development under partial shade of some forage species with agroforestry potential. *Agroforestry Systems*, 53, pp. 269–281. <https://doi.org/10.1023/A:1013323409839>
- Lisnawati, A., Lahjie, A.M., Simarankir, B.D.A.S., Yusuf, S. and Ruslim, Y., 2017. Agroforestry system biodiversity of Arabica coffee cultivation in North Toraja district, South Sulawesi, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 18(2), pp. 741–751. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d180243>
- López-López, R., Arteaga Ramírez, R., Vázquez Peña, M.A., López Cruz, I. and Sánchez Cohen, I., 2009. Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. *Agricultura Técnica en México*, 35(1), pp. 97–111.
- Lucero-Ignamarca, A., Muñoz Sáez, F., Cancino Cancino, J., Sotomayor Garretón, A., Dube, F., Sáez Carrillo, K. and Navarrete Torres, M., 2019. La cobertura arbórea de *Acacia cave* sobre la calidad de la pradera y

- microclima en un sistema silvopastoril de Chile central. *Madera y bosques*, 25(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521811>
- Macedo-Pezzopane, J.R., Bosi, C., Franceschi-Nicodemo, M., Menezes, P., Gomez da Cruz, P. and Suaiden-Parmejian, R., 2015. Microclimate and soil moisture in a silvopastoral system in southeastern Brazil. *Bragantia (Campinas)*, 74(1), pp. 110–119. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0334>
- Mackay-Smith, T.H., Burkitt, L., Reid, J., López, I.F. and Phillips, C.A., 2021. Framework for reviewing silvopastoralism: A New Zealand Hill Country Case Study. *Land*, 10(12), p. 1386. <https://doi.org/10.3390/land10121386>
- Mayer, H., Holst, T. and Schindler, D., 2002. Microclimate within beech stands: Part 1, photosynthetically active radiation. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 121(4), pp. 301–321. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1180-5>
- Munka, C., 2017. Microclima en sistemas silvopastoriles. In: C. Viñoles, J. Fedrigo and V. Benitez, eds. *Seminario en Sistemas Silvopastoriles (2016). Producción integrada para maximizar la rentabilidad. Integración ganadería forestación*. pp. 63–68.
- Muñoz-Villers, L.E., Geris, J., Alvarado-Barrientos, M.S., Holwerda, F. and Dawson, T., 2020. Coffee and shade trees show complementary use of soil water in a traditional agroforestry ecosystem. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(4), pp. 1649–1668. <https://doi.org/10.5194/hess-24-1649-2020>
- O’Conner, C., Zeller, B., Choma, C., Delbende, F., Siah, A., Waterlot, C. and Andrianarisoa, K.S., 2023. Trees in temperate alley-cropping systems develop deep fine roots 5 years after plantation: What are the consequences on soil resources? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 345, p. 108339. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108339>
- Pagliai, M., Vignozzi, N. and Pellegrini, S., 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil and Tillage Research*, 79(2), pp. 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.07.002>
- Palm, C., Blanco-Canqui, H., DeClerck, F., Gatere, L. and Grace, P., 2001. Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: Application of an organic resource database. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 83(1–2), pp. 27–42. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00267-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00267-X)
- Peri, P.L., Dube, F. and Varella, A.C., 2016. Sistemas silvopastoriles en las zonas templadas y subtropicales de América del Sur: una visión general. In: *Sistemas Silvopastoriles en el Sur de Sudamérica*, pp. 1–8.
- Pezzopane, J.R.M., Nicodemo, M.L.F., Bosi, C., Garcia, A.R. and Lulu, J., 2019. Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. *Journal of Thermal Biology*, 79, pp. 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.015>
- Rovira, P.J. and Velazco, J.I., 2008. Cuantificando el estrés calórico en vacunos en pastoreo. *Revista INIA*, 16, pp. 10–13.
- Salas-Rivera, R., Valdez-Aguilar, L.A., Alvarado-Camarillo, D., Rascón-Alvarado, E., Peña-Ramos, F.M. and González-Fuentes, J.A., 2020. Balance potasio: calcio, relación con el déficit de presión de vapor y la radiación fotosintéticamente activa en tomate de invernadero. *Terra Latinoamericana*, 38(2), pp. 301–311. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.589>
- Sanauallah, M., Chabbi, A., Girardin, C., Durand, J.L., Poirier, M. and Rumpel, C., 2014. Effects of drought and elevated temperature on biochemical composition of forage plants and their impact on carbon storage in grassland soil. *Plant and Soil*, 374(1–2), pp. 767–778. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1890-y>
- Schielzeth, H., Dingemanse, N. J., Nakagawa, S., Westneat, D. F., Allegate, H., Teplitsky, C., Réale, D., Dochtermann, N. A., Garamszegi, L. Z., & Araya-Ajoy, Y. G. (2020). Robustness of linear mixed-effects models to violations of distributional assumptions. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(9), pp. 1141–1152. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13434>
- Schinato, F., Munka, M.C., Olmos, V. and Bussoni, A.T., 2022. Microclimate, forage production and carbon storage in a eucalypt-based silvopastoral system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 344, p. 108290. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108290>

- Sileshi, G., Mafongoya, P. and Nath, A., 2020. Agroforestry systems for improving nutrient recycling and soil fertility on degraded lands. In: *Agroforestry for Degraded Landscapes: Recent Advances and Emerging Challenges*. Ed. Springer Nature.
- Tajuddin, I., 1986. Integración de animales en plantaciones de caucho. *Sistemas Agroforestales*, 4, pp. 55–66.
- Tropical Seeds LLC, n.d. Cayman® Brachiaria Hybrid cv. CIAT BR02/1752. *Tropical Seeds*. <https://www.tropseeds.com/cay>
- Velasco, E., Verdecia, J., Medina, R. and Rodriguez, L., 2001. Variaciones en el microclima de un cafetal en dependencia de la exposición a la radiación solar en las condiciones del macizo de la Sierra Maestra. *Cultivos Tropicales*, 22(3), pp. 53–59.
- Wang, W., Vinocur, B. and Altman, A., 2003. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: Towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*, 218(1), pp. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00425-003-1105-5>
- Zhang, T., Liu, Y., Zimini, Y., Yuan, L. and Wen, Z., 2024. Effects of soil moisture and atmospheric vapor pressure deficit on the temporal variability of productivity in Eurasian grasslands. *Remote Sensing*, 16(13), p. 2368. <https://doi.org/10.3390/rs16132368>
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N., Saveliev, A. A., & Smith, G. M. 2009. *Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-87458-6>