

Intercambio gaseoso de plantas jóvenes de *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg. (Euphorbiaceae) en Antioquia (Colombia)

Gas exchange in young *Hevea brasiliensis* (Willd. Ex A. Juss.) Müll. Arg. (Euphorbiaceae) plants in Antioquia (Colombia)

Intercâmbio gasoso de plantas jovens de *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg. (Euphorbiaceae) em Antioquia (Colômbia)

Oscar Córdoba-Gaona,^{1*} Danilo Augusto Monsalve-García,² Juan David Hernández-Arredondo,³ Juan José Guerra-Hincapié,⁴ Juan Pablo Gil-Restrepo,⁵ Enrique Martínez-Bustamante,⁶ Carlos Andrés Unigarro-Muñoz⁷

¹ Investigador PhD, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), Centro de Investigación El Nus. San Roque, Colombia. Correo: ocordoba@corpoica.org.co.

² Investigador máster, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), Centro de Investigación El Nus. San Roque, Colombia. Correo: dmonsalveg@corpoica.org.co.

³ Investigador máster, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), Centro de Investigación El Nus. San Roque, Colombia. Correo: jdhernandez@corpoica.org.co.

⁴ Profesional de apoyo a la investigación, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), Centro de Investigación El Nus. San Roque, Colombia. Correo: jjguerra@corpoica.org.co.

⁵ Profesional de apoyo a la investigación, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), Centro de Investigación El Nus. San Roque, Colombia. Correo: jpgil@corpoica.org.co.

⁶ Profesor titular, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ciencias Agronómicas. Medellín, Colombia. Correo: enmartin@unal.edu.co.

⁷ Asistente de investigación, Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé). Chinchiná, Colombia. Correo: carlos.unigarro@cafedecolombia.com.

Fecha de recepción: 11/11/2016

Fecha de aceptación: 24/08/2017

Para citar este artículo: Córdoba-Gaona, O., Monsalve-García, D. A., Hernández-Arredondo, J. D., Guerra-Hincapié, J. J., Gil-Restrepo, J. P., Martínez-Bustamante, E., Unigarro-Muñoz, C. A. (2018). Intercambio gaseoso de plantas jóvenes de *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg. (Euphorbiaceae) en Antioquia (Colombia). *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 19(1), 79-90.

DOI: https://doi.org/10.21930/rcta.vol19_num1_art:540

* Autor de correspondencia. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), Centro de Investigación El Nus, Corregimiento San José del Nus, municipio de San Roque, Antioquia, Colombia.

Resumen

El objetivo de este estudio consistió en conocer el comportamiento de *Hevea brasiliensis* en lo que se refiere al desempeño fotosintético, en las regiones caucheras del nordeste y el Bajo Cauca (Antioquia, Colombia), como base para futuros estudios de desempeño clonal entre ambientes. El intercambio de gases se cuantificó mediante un analizador infrarrojo de gases portátil, y en las variables fotosintéticas para los siete clones se calculó un valor medio, a partir del cual se estimó el área bajo la curva. El máximo valor de fotosíntesis se alcanzó a las 8:00 en San Roque (10,97 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), y 9:00 en Caucasia (7,84 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$). La transpiración máxima fue de 3,55 $\text{mmol} [\text{H}_2\text{O}] \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en San Roque, y

de 5,16 $\text{mmol} [\text{H}_2\text{O}] \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en Caucasia, mientras que la conductancia estomática máxima fue de 0,18 $\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y de 0,16 $\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, respectivamente. Las plantas de caucho en Caucasia presentaron una mayor tasa de asimilación neta acumulada (271.934 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{día}^{-1}$), superando los 226.287 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{día}^{-1}$ de San Roque, lo que representa una diferencia de 45.647,52 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{día}^{-1}$. La mayor acumulación de carbono con menor inversión de energía lumínica (697.638 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \mu\text{mol} [\text{fotón}]^{-1}\text{día}^{-1}$) se obtuvo en San Roque. Por lo tanto, en lo que respecta al intercambio gaseoso y al uso de la energía lumínica, *Hevea brasiliensis* presentó una mayor adaptación ambiental en San Roque.

Palabras clave: *Hevea brasiliensis*, rendimiento de cultivos, factores ambientales, intercambio de gases

Abstract

The aim of this study was to determine the behavior of the rubber plant *Hevea brasiliensis* regarding its photosynthetic performance in the rubber producer regions in Nordeste and Bajo Cauca, in the department of Antioquia, Colombia, as a baseline for future clonal performance studies among environments. Gas exchange was recorded using a portable infrared gas analyzer, and for the photosynthetic parameters for seven genotypes (clones) a medium value was calculated and was later used to estimate the area under the curve. The maximum photosynthetic value was reached at 8:00 hours in San Roque (10.97 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) and at 9:00 hours in Caucasia (7.84 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Maximum transpiration

was 3.55 $\text{mmol} [\text{H}_2\text{O}] \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ in San Roque and 5.16 $\text{mmol} [\text{H}_2\text{O}] \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ in Caucasia, while the maximum stomatal conductance was 0.18 $\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ and 0.16 $\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ in San Roque and Caucasia, respectively. The rubber plants in Caucasia had a higher accumulated net assimilation rate (271,934 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{day}^{-1}$) than what was found in San Roque (226,287 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{day}^{-1}$), showing a difference of 45.647,52 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{day}^{-1}$. The highest carbon accumulation with the lowest light energy investment (697,638 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \mu\text{mol} [\text{photon}]^{-1}\text{day}^{-1}$) was found in San Roque. Therefore, regarding gas exchange and the use of light energy *Hevea brasiliensis* showed greater environmental adaptation in San Roque.

Keywords: Crop yield, environmental factors, gas exchange, *Hevea brasiliensis*

Resumo

O objetivo deste estudo consistiu em conhecer o comportamento de *Hevea brasiliensis* no que se refere ao desempenho fotossintético, nas regiões borracheiras do nordeste e do Baixo Cauca (Antioquia, Colômbia), como base para futuros estudos de desempenho clonal entre ambientes. O intercâmbio de gases foi quantificado mediante um analisador infravermelho de gases portátil, e nas variáveis fotossintéticas para os sete clones foi calculado um valor médio, a partir do qual foi estimada a área sob a curva. O máximo valor de fotossíntese foi alcançado às 8:00 em San Roque (10,97 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), e 9:00 em Caucasia (7,84 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$). A transpiração máxima foi de 3,55 $\text{mmol} [\text{H}_2\text{O}] \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ em San Roque, e de

5,16 $\text{mmol} [\text{H}_2\text{O}] \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ em Caucasia, enquanto a condutância estomática máxima foi de 0,18 $\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e de 0,16 $\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, respectivamente. As plantas de borracha em Caucasia apresentaram maior taxa de assimilação líquida acumulada (271.934 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$), superando os 226.287 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ de San Roque, o que representa uma diferença de 45.647,52 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. A maior acumulação de carbono com menor investimento de energia lumínica (697.638 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \mu\text{mol} [\text{fóton}]^{-1}\text{dia}^{-1}$) obteve-se em San Roque. Portanto, no que se refere ao intercâmbio gasoso e ao uso da energia lumínica, *H. brasiliensis* apresentou maior adaptação ambiental em San Roque.

Palavras chave: fator ambiental, *Hevea brasiliensis*, rendimento de cultura, troca gasosa

Introducción

El caucho *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg. es una especie perenne caducifolia de la familia Euphorbiaceae. Su látex se aprovecha para la producción de caucho natural. Esta especie está ampliamente distribuida en el mundo, y su centro de origen y de diversidad se encuentra en la cuenca amazónica del continente suramericano (Schultes, 1970; Silva, Gonçalves, Scarpore, & Costa, 2010).

Según el International Rubber Study Group (IRSG), en 2015 la producción mundial fue de 12,27 millones de toneladas, y el consumo de 12,15 millones (IRSG, 2016). Estas materias primas se usan principalmente en la industria automotriz (70%) (Clément-Demange, Priyadarshan, Hoa, & Venkatachalam, 2007; Priyadarshan, Gonçalves, & Omokhafa, 2009).

En el ámbito nacional, el censo cauchero realizado en 2015 reportó 52.200 ha de cultivos de caucho (Confederación Cauchera Colombiana [CCC] y Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica], 2015), con un crecimiento medio de cerca de 3.000 ha por año, puesto que Castellanos, Fonseca y Barón (2009) afirman que en 2008 se reportaron 30.500 ha, a causa del aumento progresivo de nuevas plantaciones de caucho en Colombia (Sterling, Suárez, Rodríguez, Caicedo, Salas, & Virguez, 2015).

Por lo tanto, es necesario tener un mayor conocimiento del comportamiento de *H. brasiliensis* en cuanto al desempeño de parámetros agronómicos, como el rendimiento y la producción de biomasa, en las condiciones ambientales de las regiones heveícolas de Colombia.

Sin embargo, debido a que el caucho natural es una especie que tiene un aprovechamiento tardío (entre cinco y siete años), el registro del rendimiento como característica de interés agronómico y económico hace que los procesos se prolonguen, como los programas de mejoramiento genético (Rodrigo, 2007) y la explicación del desempeño de *H. brasiliensis* en condiciones ambientales adversas o favorables (estabilidad fenotípica e interacción genotipo por ambiente).

Algunas variables ecofisiológicas como fotosíntesis neta (A), conductividad estomática (g) y tasa transpiratoria (E) han sido ampliamente estudiadas, debido a su aplicabilidad en la explicación de los fenómenos de adaptación del caucho natural a las condiciones ambientales (Lambers, Pons, & Chapin, 2008; Nataraja & Jacob, 1999; Nugawela, Long, & Aluthhewage, 1995; Rodrigo, 2007), y otros autores mencionan incluso asociaciones positivas entre estas variables y la producción de biomasa (Nataraja y Jacob, 1999; Samsuddin, 1986; Sobhana, Sethuraj, & Vijayakumar, 1995) y el caucho seco (Samsuddin, Tan, & Yoon, 1987).

Antes de conocer el desempeño de genotipos específicos de caucho en diferentes ambientes, es necesario determinar el comportamiento de la especie *H. brasiliensis* en las zonas caucheras de Colombia. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue conocer ese comportamiento, a partir del estudio de variables ecofisiológicas en las condiciones ambientales de las regiones caucheras del nordeste y el Bajo Cauca (Antioquia, Colombia), que permitan entender, en primera instancia, los procesos de adaptación de esta especie, como base para futuros estudios de desempeño en el ámbito clonal entre ambientes.

Materiales y métodos

Localización

Esta investigación se llevó a cabo en dos campos clonales a pequeña escala (CCPE), establecidos en Antioquia, como parte del proyecto "Mejoramiento de la productividad para el desarrollo y aumento en la competitividad en la cadena del caucho natural, mediante un programa de investigación aplicada e innovación en el departamento de Antioquia", financiado con recursos del Sistema General de Regalías (SGR) para el departamento.

El CCPE del Bajo Cauca antioqueño se encuentra en el municipio de Caucasia, corregimiento de Cacerí, vereda Bella Palmira, en la finca Las Golondrinas, a 07°60'00" N, 75°15'00" E, y a una altitud de 78,69 m s. n. m. Presenta una temperatura promedio de 28 °C, una precipitación promedio anual de 2.575 mm, un clima cálido húmedo, y un suelo Hapludult

típico, arcilloso y con un pH de 4,4, clasificado como extremadamente ácido.

Por su parte, el ccpe del nordeste antioqueño se localiza en el municipio de San Roque, corregimiento de San José del Nus, en el Centro de Investigación El Nus de Corpoica, a 06°26'17,2" N, 74°49'32,1" E, y a una altitud de 848 m s.n.m. Tiene una temperatura promedio de 24 °C, una precipitación promedio anual de 2.500 mm, un clima cálido húmedo, y un suelo Dystrudept óxico, franco-arcillo-arenoso, con un pH de 4,5, clasificado como muy fuertemente ácido (Córdoba, Monsalve, Vasco, Villa, Guerra, & Escobar, 2015).

Cada CCPE estuvo constituido por 7 clones de caucho (CDC 56, CDC 312, FDR 5788, FDR 4575, FX 4098, FX 3864 y GU 198). Aquellos de la serie CDC y FDR forman parte de la colección Cirad-Michelin Selection (CMS), los FX (Ford Cross) pertenecen al programa de hibridación de la compañía Ford, mientras que la serie GU hace parte del programa de mejoramiento de Guatemala.

Cada material se estableció en parcelas de 20 individuos y en cuatro repeticiones, a una distancia de siembra de 7,0 × 2,8 m en cuadro. El material vegetal fue adquirido en el jardín clonal de la Asociación de Reforestadores y Cultivadores de Caucho del Caquetá (Asoheca).

Evaluación del intercambio gaseoso

Con el fin de determinar el comportamiento fotosintético de los clones de caucho, se realizaron evaluaciones en plantas de 45 días de edad después del trasplante, en las que se registraron las tasas de intercambio gaseoso diurno en "curva jornalera" en cada localidad, con una frecuencia de una hora, en el intervalo de las 6:00 a las 18:00, mediante un analizador infrarrojo de gases (IRGA), sistema portátil de fotosíntesis LCi (ADC BioScientific).

Se tomaron de tres a cinco medidas en una hoja madura en estado ontogénico *D*, sana, recientemente formada, y se determinaron las siguientes variables: tasa de asimilación neta (*A*), conductancia estomática (*g_s*), transpiración (*E*) y radiación fotosintéticamente activa (*RFA*); a partir de las

cuales se calcularon la eficiencia en el uso del agua (*EUA*): A/E , y la eficiencia en el uso de la radiación (*EUR*): A/RFA .

Análisis estadístico

En cada una de las localidades y para cada variable se calculó un valor medio para los siete clones, a partir del cual se estimó el área bajo la curva (ABC), mediante el fraccionamiento del total en áreas trapezoidales más pequeñas, en las que el ancho de cada una corresponde al tiempo entre dos mediciones, mientras que la altura fue el valor medio de dos medidas consecutivas. Estas áreas individuales se calcularon usando la ecuación del trapecio (ecuación 1).

(Ecuación 1)

$$\text{Área} = 0,5 * (m_i + m_{i-1}) * (t_i - t_{i-1})$$

Donde m_i correspondió a la *i*-ésima medición, en tanto que t_i fue el *i*-ésimo tiempo. Por consiguiente, el ABC es la sumatoria de todas las áreas individuales estimadas (ecuación 2). Este es un método simple y eficiente al implementar conceptos de geometría plana.

(Ecuación 2)

$$ABC = \sum_{i=2}^n 0.5 * (m_i + m_{i-1}) * (t_i - t_{i-1})$$

La macro del entorno estadístico SAS® que se desarrolló en el presente trabajo es una adaptación de las rutinas que detallaron Huang y Xiao (2010) y Shiang (2004) para calcular las áreas por encima del eje horizontal ($A > 0$), como fotosíntesis (asimilación bruta de CO_2), y por debajo ($A < 0$), como respiración oscura o fotorrespiración, así como su diferencia, denominada asimilación neta de CO_2 (balance de carbono).

La programación en la macro SAS® para el cálculo del ABC usa lenguaje (DATA Steps) y procedimientos del producto SAS/BASE®, versión 9.3 del sistema sas para Windows. Con el procedimiento PROC MEANS se sumaron los valores de fotosíntesis, respiración y acumulación de carbono por clase, con la opción SUM.

Resultados y discusión

Intercambio gaseoso

El comportamiento fotosintético diurno de las plantas de caucho se observa a partir de la evolución de la conductancia estomática (figura 1), la cual en la localidad de San Roque tiene un incremento inicial a las 7:00, seguido por un descenso constante hasta el mediodía (12:00), cuando ocurre un cierre parcial de los estomas. A partir de este momento reactiva su apertura, la mantiene hasta las 16:00, y posteriormente ocurre de nuevo el cierre parcial. En la localidad de Caucasia, el comportamiento es similar, aunque la apertura estomática se da solo a partir de las 8:00, la reducción gradual se evidencia con un mínimo (0,06 mol [CO₂] m⁻²s⁻¹) a las 11:00, con un subsiguiente aumento progresivo, a las

16:00 presenta de nuevo una disminución, luego un incremento en la siguiente hora, y el cierre parcial estomático final ocurre a las 18:00.

La fotosíntesis inicial en ambas localidades tiene un comportamiento similar (figura 2): un aumento gradual a partir del comienzo de la apertura estomática de las hojas, hasta alcanzar un máximo a las 8:00 en San Roque (10,97 μmol [CO₂] m⁻²s⁻¹) y las 9:00 en Caucasia (7,84 μmol [CO₂] m⁻²s⁻¹), seguido de una reducción paulatina, hasta alcanzar su valor mínimo a las 12:00 en San Roque y las 11:00 en Caucasia. En esta última localidad se observó un pico, aún mayor que el inicial, a las 12:00 y a las 13:00; y en San Roque, uno con menor intensidad a las 14:00, comportamiento semejante al encontrado en la transpiración (figura 3). Después de los respectivos aumentos, comienza el descenso

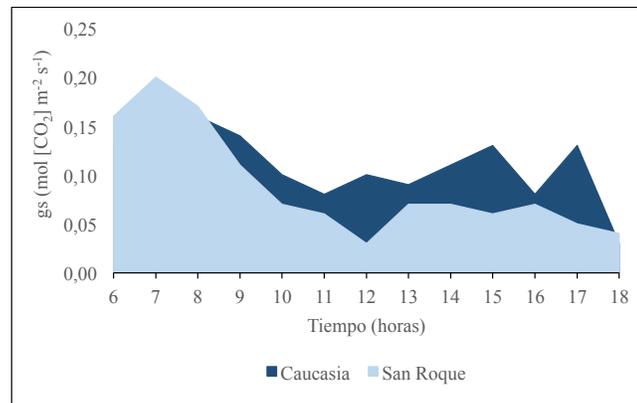


Figura 1. Comportamiento de la conductancia estomática (g_s) diaria en los municipios de Caucasia y San Roque. Fuente: Elaboración propia

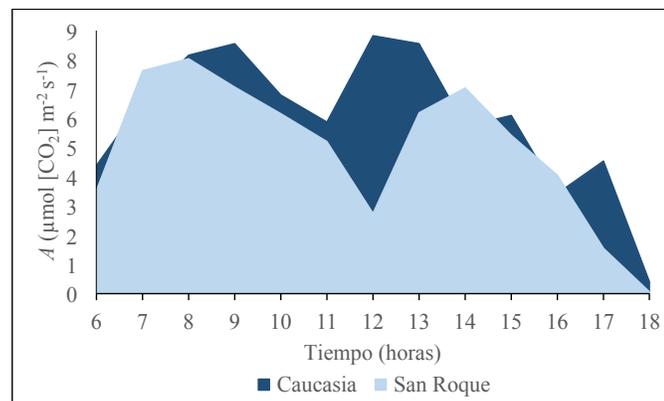


Figura 2. Comportamiento de la fotosíntesis (A) en los municipios de Caucasia y San Roque. Fuente: Elaboración propia

gradual en la fotosíntesis, hasta alcanzar su mínimo a las 18:00.

Al evaluar la actividad fotosintética durante la ontogenia de la hoja de tres clones de caucho, Miguel, Mota de Oliveira, Ramos y Melo de Oliveira (2007) señalaron que PB 235, RRIM 600 y GT 1 tuvieron un comportamiento fotosintético similar y alcanzaron los máximos valores de fotosíntesis neta entre los 7 y 11 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{m}^{-2}\text{día}^{-1}$ en el estado de desarrollo *D* (hoja completamente expandida). Según Bergonci (1981), citado por los autores mencionados, esto indica que la mayor fotosíntesis y la más alta conductancia estomática se logran en hojas desarrolladas en su totalidad.

Por otro lado, Cavalcante y Conforto (2002) evaluaron el intercambio gaseoso de cinco clones de

caucho en fase de establecimiento, y no encontraron diferencias en la respuesta fotosintética de los distintos clones en el periodo húmedo, en la región del Planalto Paulista occidental, donde presentaron valores medios de 9,45 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, con una transpiración de 3,84 $\text{mmol} [\text{H}_2\text{O}] \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y una conductancia de 0,096 $\text{mol} [\text{H}_2\text{O}] \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Estos valores de transpiración son similares a los logrados en este experimento, en el que su valor máximo (figura 3) fue de 5,16 $\text{mmol} [\text{H}_2\text{O}] \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en Caucasia y de 3,55 $\text{mmol} [\text{H}_2\text{O}] \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en el municipio de San Roque. La g_s máxima fue 0,16 $\text{mol} [\text{H}_2\text{O}] \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y 0,18 $\text{mol} [\text{H}_2\text{O}] \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, respectivamente en cada localidad.

En la figura 4 se observa el comportamiento diferencial de la radiación fotosintéticamente activa

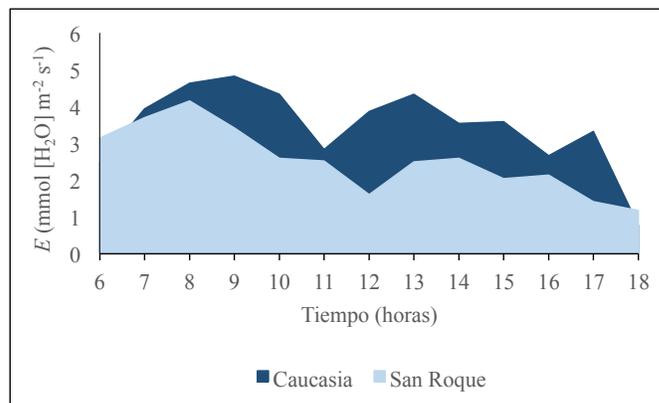


Figura 3. Comportamiento de la transpiración (*E*) en los municipios de Caucasia y San Roque. Fuente: Elaboración propia

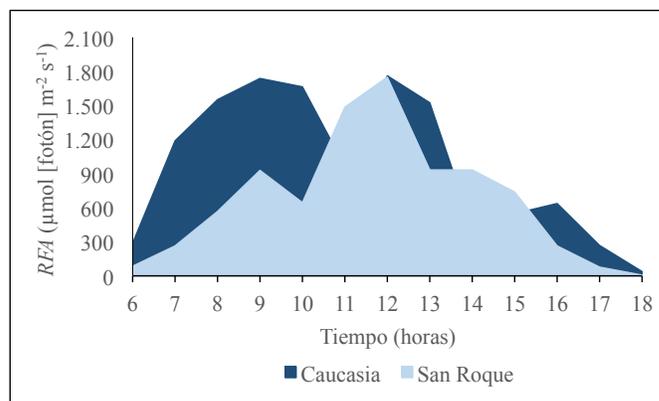


Figura 4. Comportamiento de la radiación fotosintéticamente activa (*REA*) en los municipios de Caucasia y San Roque. Fuente: Elaboración propia

(*REA*): en el caso de San Roque, comienza con un incremento gradual, hasta llegar a un pico (1.750 μmol [fotón] $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$), a partir del cual decrece con rapidez hasta las 18:00. En Caucasia, el aumento inicial es mucho más rápido, alcanza valores cercanos a los 1.500 μmol [fotón] $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ a las 8:00, disminuye a 1.000 μmol [fotón] $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, luego alcanza otro pico entre las 12:00 y las 13:00, y después se reduce paulatinamente hasta las 18:00.

En la localidad de San Roque, la eficiencia del uso de la radiación (*EUR*) inicial fue mayor, lo cual se apreció ostensiblemente a las 10:00, momento en el que la eficiencia en Caucasia es 0 y en San Roque es 0,05 μmol [CO_2] μmol [fotón] $^{-1}$. A partir de las 11:00 los valores son similares, excepto a las 11:00, 12:00 y 15:00, cuando las plantas de caucho

en Caucasia presentaron una eficiencia un poco superior (figura 5).

El comportamiento de la eficiencia en el uso del agua (*EUA*) es sustancialmente mayor en las plantas de la localidad de San Roque (figura 6), donde presentan una eficiencia constante hasta las 11:00. Vale la pena aclarar que el acumulado entre las 11:00 y las 13:00 es superior en Caucasia, lo que da indicios de que se da una regulación estomática en esta zona, que permite evitar grandes pérdidas de agua. A partir de ese momento, comienza un incremento que llega a un máximo de 2,76 μmol [CO_2] mmol [H_2O] $^{-1}$, que se mantiene hasta las 15:00.

En Caucasia, la evolución de la eficiencia tiene solo un pequeño incremento, entre las 11:00 y las 13:00,

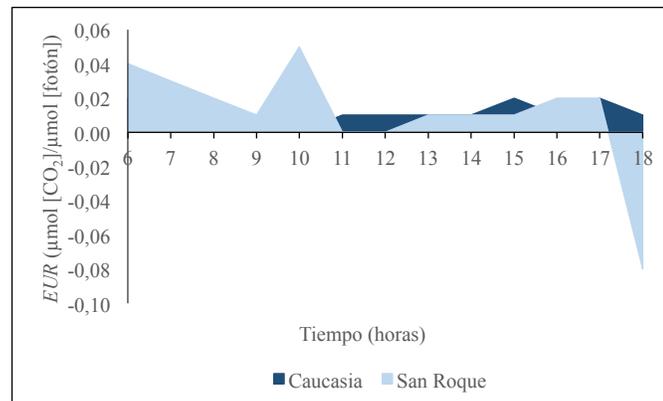


Figura 5. Comportamiento de la eficiencia del uso de la radiación (*EUR*) en los municipios de Caucasia y San Roque. Fuente: Elaboración propia

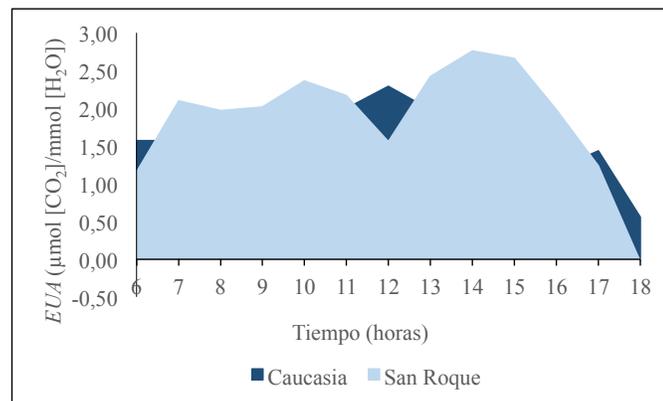


Figura 6. Comportamiento de la eficiencia del uso del agua (*EUA*) en los municipios de Caucasia y San Roque. Fuente: Elaboración propia

hasta alcanzar $2,29 \mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{mmol} [\text{H}_2\text{O}]^{-1}$. Durante todo el periodo, las variaciones fueron cercanas a $1,5 \mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{mmol} [\text{H}_2\text{O}]^{-1}$.

Área bajo la curva

De acuerdo con los resultados de la estimación del área bajo la curva en las dos localidades (tabla 1), las plantas de caucho establecidas en Caucasia presentaron una mayor tasa de asimilación neta acumulada (A), $271.934,68 \mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, que supera los $226.287,16 \mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{m}^{-2}\text{día}^{-1}$ que se obtuvieron en San Roque, lo que representa una diferencia de $45.647,52 \mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{m}^{-2}\text{día}^{-1}$.

Lo anterior se puede explicar porque la radiación fotosintéticamente activa (RFA) hizo un mayor aporte de energía en Caucasia, ya que en dicha localidad se registró una diferencia respecto a San Roque que ascendió a $13.695.797 \mu\text{mol} [\text{fotón}] \text{m}^{-2}\text{día}^{-1}$.

Luego de analizar la relación entre la fotosíntesis neta y la radiación fotosintéticamente activa, que da como resultado la eficiencia en el uso de la radiación (EUR), se encontró que, contrario a lo sucedido con los valores de asimilación de carbono y radiación fotosintética registrados en Caucasia, la mayor acumulación de carbono con menor inversión de energía lumínica ($697.638 \mu\text{mol} [\text{CO}_2] \mu\text{mol} [\text{fotón}]^{-1}\text{día}^{-1}$) se obtuvo en San Roque (tabla 1).

Lo anterior constituye un rasgo intrínseco de la adaptación de las plantas a determinadas condiciones ambientales, como la oferta lumínica, y a características ecofisiológicas propias del caucho, como los bajos puntos de compensación y saturación de la luz (Nataraja & Jacob, 1999), ya que, como lo menciona De Costa (2000), a las plantas que presentan un bajo punto de compensación de la luz (pcl) se les facilita mantener un balance positivo de carbono y seguir asimilándolo, incluso con una baja radiación absorbida.

Respecto a la tasa transpiratoria (E), el caucho plantado en Caucasia registró los valores más altos, transfiriendo a la atmósfera un acumulado total de $156.564,19 \text{mmol} [\text{H}_2\text{O}] \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, frente a los $110.946,11 \text{mmol} [\text{H}_2\text{O}] \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ que alcanzó San Roque. Este resultado es concomitante con la respuesta encontrada para las variables de fotosíntesis neta y de la radiación fotosintéticamente activa en las dos localidades.

Así mismo, cuando se analiza la relación entre la fotosíntesis neta y la transpiración, comúnmente descrita como eficiencia en el uso del agua (EUA), se observa que en San Roque (tabla 1) las plantas lograron acumular una mayor cantidad de carbono en relación con el gasto de agua ($85.770,72 \mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{mmol} [\text{H}_2\text{O}]^{-1}\text{día}^{-1}$).

Tabla 1. Áreas bajo la curva en las variables de intercambio gaseoso y su eficiencia en las dos localidades

Variable	Caucasia	San Roque
A ($\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{m}^{-2}\text{día}^{-1}$)	271.935	226.287
RFA ($\mu\text{mol} [\text{fotón}] \text{m}^{-2}\text{día}^{-1}$)	44.723.101	31.027.304
g_s ($\text{mol} [\text{CO}_2] \text{m}^{-2}\text{día}^{-1}$)	4.472	3.809
E ($\text{mmol} [\text{H}_2\text{O}] \text{m}^{-2}\text{día}^{-1}$)	156.564	110.946
EUR ($\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \mu\text{mol} [\text{fotón}]^{-1} \text{m}^{-2}\text{día}^{-1}$)	417.568	697.638
EUA ($\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{mmol} [\text{H}_2\text{O}]^{-1} \text{día}^{-1}$)	69.656	85.771

A : tasa de asimilación neta; RFA : radiación fotosintéticamente activa; g_s : conductancia estomática; E : tasa de transpiración; EUR : eficiencia en el uso de la radiación; EUA : eficiencia en el uso del agua.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con lo expresado por Phillips y Oren (2001), las plantas pueden acoplarse al microclima o a la humedad del suelo de una región determinada, así como modificar considerablemente el gasto de agua, lo que puede resultar en un adecuado mantenimiento de la transpiración de las plantas. Por lo tanto, es probable que en San Roque el caucho tenga una mejor adaptación a la oferta hídrica, tanto del suelo como del ambiente.

El aporte de la *RFA* en Caucasia permitió obtener las tasas de conductancia estomática (g_s) más altas, e incluso propició una mayor asimilación del carbono respecto a aquella de San Roque, ya que el flujo de gas carbónico por unidad de área registrado en Caucasia ($4.471,75 \text{ mol } [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{día}^{-1}$), superó las $3.809,18 \text{ mol } [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2}\text{día}^{-1}$ logradas en San Roque (tabla 1).

Lo anterior plantea que en San Roque las plantas de caucho tienen un mayor control estomático en lo que respecta al ingreso y salida de gases (flujo), lo que les permite ser más eficientes en la toma del carbono y el consumo de agua, ya que, como lo mencionan Mokhtar, Daud y Arbain (2011), en evaluaciones de plantas de caucho sometidas a distintos niveles de riego, la reducción en la conductancia estomática, causada por el cierre de las células guarda, fuerza a los estomas a disminuir la tasa de transpiración, aunque se afecte la tasa fotosintética.

En términos generales, aunque en la localidad de Caucasia, en comparación con lo observado en San Roque, los árboles de caucho presentaron mayores tasas acumuladas en los parámetros fotosintéticos, como fotosíntesis neta (A), radiación fotosintéticamente activa (*RFA*), transpiración (E) y conductancia estomática (g_s), las mayores eficiencias en el uso del agua y de la radiación se obtuvieron en San Roque.

Esto se puede explicar por el hecho de que Caucasia, localizada en un clima cálido húmedo, brinda condiciones para un mejor desempeño fotosintético; sin embargo, a una mayor temperatura ($28 \text{ }^\circ\text{C}$) y radiación hacen que el uso eficiente del agua (*UEA*) y de la radiación (*UER*) sean menores en relación con la localidad de San Roque, donde tanto la temperatura media ($24 \text{ }^\circ\text{C}$)

como la radiación fotosintéticamente activa fueron inferiores.

Conclusiones

El mejor desempeño fotosintético de plantas jóvenes de caucho se presentó en el municipio de Caucasia, mientras que la mayor eficiencia en el uso de la radiación y del agua se logró en la localidad de San Roque, lo que da indicios de que *H. brasiliensis* tiene un mayor grado de adaptabilidad a la oferta ambiental de esta última. Sin embargo, es probable que, si se establecen aportes hídricos complementarios a la oferta ambiental de Caucasia, se pueda mejorar el comportamiento ecofisiológico de la especie.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Gobernación de Antioquia, por la financiación del convenio especial de cooperación 46000001081, del Sistema General de Regalías Antioquia 2013, del cual hizo parte esta investigación. Así mismo, manifiestan su agradecimiento a la Universidad Eafit, por la administración del proyecto; y a la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, la Universidad de Antioquia, el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), la Asociación Comité de Cultivadores de Caucho (Asculticaucho), la Asociación de Productores de Caucho de Cargueros y Bijagual (Ascabia), así como al productor de la finca Las Golondrinas.

Descargos de responsabilidad

Esta investigación hizo parte del convenio especial de cooperación 46000001081 del Sistema General de Regalías Antioquia 2013, denominado "Mejoramiento de la productividad para el desarrollo y aumento en la competitividad en la cadena del caucho natural, mediante un programa de investigación aplicada e innovación en el departamento de Antioquia". Los autores declaran que el conocimiento que se produjo en este artículo es inédito, parte de información original y que se respetaron los derechos de autor de los investigadores citados en el mismo.

Referencias

- Bergonci, J. I. (1981). *Estudios ecofisiológicos relacionados con o balanço de CO₂ durante a ontogenia foliar em Hevea brasiliensis Müell. Arg.* (tesis de maestría). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil.
- Castellanos, O., Fonseca, S., & Barón, M. (2009). *Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de caucho natural y su industria en Colombia*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Cavalcante, J. R., & Conforto, E. C. (2002). Desempenho de cinco clones jovens de seringueira na região do planalto occidental paulista. *Bragantia*, 61(3), 237-245.
- Clément-Demange, A., Priyadarshan, P., Hoa, T. T. T., & Venkatachalam, P. (2007). *Hevea* rubber breeding and genetics. En J. Janick (Ed.). *Plant Breeding Reviews*. Hoboken, EE. UU.: John Wiley & Sons.
- Confederación Cauchera Colombiana (CCC), & Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). (2015). *Banco de datos estructurado, ajustado, homogenizado como insumo del sistema de información geográfico (sig-Caucho)* (Informe final). Bogotá, Colombia: ccc, Corpoica, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Córdoba, O., Monsalve, D., Vasco, J., Villa, M., Guerra, J., & Escobar, C. (2015). *Análisis del estado del arte en ecofisiología, fitosanidad y genética de caucho natural (Hevea brasiliensis Müell. Arg.) como base para la investigación en el Bajo Cauca y Magdalena Medio* (Informe de revisión). Bogotá, Colombia: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de Cundinamarca (SADR) y Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).
- De Costa, W. A. (2000). *Principles of crop physiology: Towards an understanding of crop yield determination and improvement*. Peradeniya, Sri Lanka: University of Peradeniya.
- Dey, S. K., Sobhana, P., Sethuraj, M. R., & Vijayakumar, K. R. (1995). Photosynthetic rate and its relation with leaf characteristics in seedlings of *Hevea brasiliensis*. *Indian Journal of Natural Rubber Research*, 8(1), 66-69.
- Huang, Q., & Xiao, L. (2010, noviembre). *Calculate the area above and/or below a given reference line using SAS® Data Steps*. *Proceedings 2010*. Simposio llevado a cabo en la conferencia de Western Users of sas Software, San Diego, California, EE. UU. Recuperado de http://www.lexjansen.com/wuss/2010/coders/3025_5_COD-Huang.pdf.
- International Rubber Study Group (IRSG). (2016). *Natural rubber (NR) production, consumption, trade (exports and imports) and stocks* (IRSG Rubber Statistical Bulletin, July-September, 2016). Singapur: IRSG.
- Lambers, H., Pons, T. L., & Chapin, F. S. (2008). *Plant Physiological Ecology* (2ª ed.). Nueva York, EE. UU.: Springer.
- Miguel, A. A., Mota de Oliveira, L. E., Ramos, P. A., & Melo de Oliveira, D. (2007). Photosynthetic behavior during the leaf ontogeny of rubber tree clones [*Hevea brasiliensis* (Wild. ex. Adr. Juss.) Muell. Arg.], in Lavras, MG. *Ciência e Agrotecnologia*, 31(1), 91-97.
- Mokhatar, S. J., Daud, N. W., & Arbain, N. (2011). Performance of *Hevea brasiliensis* on Haplic Ferralsol as affected by different water regimes. *American Journal of Applied Sciences*, 8(3), 206-211.
- Nataraja, K., & Jacob, J. (1999). Clonal differences in photosynthesis in *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. *Photosynthetica*, 36(1-2), 89-98.
- Nugawela, A., Long, S., & Aluthhewage, R. K. (1995). Possible use of certain physiological characteristics of young *Hevea* plants predicting yield at maturity. *Indian Journal of Natural Rubber Research*, 8, 100-108.
- Phillips, N., & Oren, R. (2001). Intra- and inter-annual variation in transpiration of a pine forest. *Ecological Applications*, 11(2), 385-396.
- Priyadarshan, P. M., Gonçalves, P. S., & Omokhafa, K. O. (2009). Breeding *Hevea* rubber. En S. M. Jain & P. M. Priyadarshan (Eds.). *Breeding plantation tree crops* (pp. 469-522). Nueva York, EE. UU.: Springer.
- Rodrigo, V. (2007). Ecophysiological factors underpinning productivity of *Hevea brasiliensis*. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4), 245-255.
- Samsuddin, Z. (1986). Assessing the practical uses of some physiological parameters in *Hevea*. En P. Yanqing and Z. Canwen (Eds.). *Proceedings of IRRDB Meeting of physiology and exploitation* (pp. 158-169). Hainan, China: South China Academy of Tropical Crops (SCATC).
- Samsuddin, Z., Tan, H., & Yoon, P. (1987). Correlation studies on photosynthetic rates, girth and yield in *Hevea brasiliensis*. *Journal of Natural Rubber Research*, 2, 46-54.
- Schultes, R. (1970). The history of taxonomic studies in *Hevea*. *The Botanical Review*, 36(3), 210-219.
- Shiang, K. (2004, octubre). *The SAS® Calculations of areas under the curve (auc) for multiple metabolic readings*. *Proceedings 2004*. Simposio llevado a cabo en la conferencia de Western Users of sas Software, San Diego, California, EE. UU. Recuperado de http://www.lexjansen.com/wuss/2004/posters/c_post_the_sas_calculations_.pdf.
- Silva, J., Gonçalves, P., Scarpate, J., & Costa, R. (2010). Agronomical performance and profitability of exploitation systems in four rubber tree clones in São Paulo State. *Bragantia*, 69(4), 843-854.
- Sterling, A., Suárez, J., Rodríguez, C., Caicedo, D., Salas, Y., & Virgüez, Y. (2015). Crecimiento inicial de clones promisorios de *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg. en sistema agroforestal en Caquetá, Colombia. *Colombia Forestal*, 18(2), 175-192.

