

Captación y uso de la radiación en plantas de estevia (*Stevia rebaudiana* Bert.) en el Caribe colombiano

Light capture and use by plants of stevia (*Stevia rebaudiana* Bert.) in the Colombian Caribbean

Alfredo Jarma O.^{1,4}, Carlos Carranza G.² y Jairo Clavijo P.³

RESUMEN

La captación y uso eficiente de la radiación en estevia, especie productora de edulcorantes no calóricos, es un aspecto fundamental de su explotación en regiones cálidas del Neotrópico colombiano. Sin embargo, los trabajos sobre estos aspectos son escasos. La presente investigación se realizó en el municipio de Montería (Córdoba, Colombia) durante las estaciones secas de 2007 y 2008 (E1 y E2), para determinar el efecto de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) sobre la producción de biomasa de los genotipos Morita 1 (M1) y Morita 2 (M2), establecidos a densidades de siembra de 25,00; 12,50 y 6,25 plantas/m². En ambas estaciones se usó un diseño experimental de bloques completos al azar con arreglo factorial 2 x 3. Se utilizó un modelo matemático que calculó la tasa de acumulación diaria de masa seca (MS) en hojas y tallo (simulada con el método de integración de Euler), a partir de la RFA, la fracción de la RFA interceptada por el dosel (FLINT) y el uso eficiente de la radiación (UER). En E1 se presentaron en promedio 3 MJ m⁻² día⁻¹ más que en E2, y un desarrollo del índice de área foliar IAF (3,12±0,02) que fue casi tres veces el registrado en E2. Consecuentemente, el valor más alto del coeficiente de extinción de luz a través del dosel ($k = 0,21$) lo registró M2 durante la estación E1, a la densidad de 25 plantas/m². Durante este mismo periodo se observaron los valores más altos de UER (2,04 g MJ RFA) y el máximo porcentaje de distribución de MS total hacia las hojas, que fue del 60% en M2.

Palabras clave: distribución de materia seca, modelos de simulación, radiación fotosintéticamente activa, dulzura.

ABSTRACT

The capture and efficient use of solar radiation in stevia, a non-caloric sweetener producing species, is a fundamental aspect of its cultivation in the hot neotropical regions of Colombia. Notwithstanding, works dealing with this aspect are currently scarce. On these grounds, the present research study sought to determine the effect of photosynthetically active radiation (PAR) on the biomass production of stevia genotypes Morita 1 (M1) and Morita 2 (M2), at planting densities of 25.00, 12.50 and 6.25 plants/m². The experiment was conducted in the municipality of Monteria (Cordoba, Colombia), during the dry seasons of 2007 and 2008 (E1 and E2). In both occasions, a completely randomized block design with a 2 x 3 factorial arrangement was applied. A mathematical model calculated the cumulative daily rate of dry matter (DM) production for leaves and stem (simulated with Euler's integration method), using light use efficiency (LUE), PAR and its intercepted-by-the-canopy fraction (FLINT) as inputs. During E1, the dry mass record was 3 MJ m⁻² day⁻¹ larger than that of E2; and the foliar area index (FAI) (3.12±0.02) was almost three times that of E2. As a consequence, the highest value of the light extinction coefficient ($k = 0.21$) was recorded in the 25 M2 plants/m² experiment during E1. This same season allowed the highest LUE values (2.04 g MJ PAR), as well as the largest record of DM distribution to the leaves, which raised up to 60% in the case of M2.

Key words: dry matter distribution, simulation models, photosynthetically active radiation, sweetness.

Introducción

Estevia (*Stevia rebaudiana* Bert.) es una especie cultivada en muchos países debido a su poder edulcorante que puede a ser hasta 300 veces más potente que la sacarosa (Jarma, 2008). Sus dos principales edulcorantes, esteviósido y rebaudiósido A, son altamente consumidos no solo por personas con diabetes o dietas especiales, sino por el cada

vez más creciente público que consume productos naturales bajos en calorías (Fronza y Folegatti, 2003).

El cultivo de estevia puede realizarse en áreas pequeñas o grandes, con excelente opción de rentabilidad en ambos casos; algunos trabajos sobre la fisiología de la especie en

Fecha de recepción: 16 de febrero de 2010. Aceptado para publicación: 5 de marzo de 2010.

¹ Departamento de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba, Montería (Colombia).

² Departamento de Agronomía, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá (Colombia).

³ Asesor particular, Bogotá (Colombia).

⁴ Autor de correspondencia. ajarma@sinu.unicordoba.edu.co

el Caribe colombiano han reportado valores de área foliar entre 878 y 1.700 cm² a los 225 días después de trasplante (ddt) y de hasta 27 g de hoja seca por planta (Jarma, 2008). Sin embargo, después de cultivarse hace aproximadamente diez años en Colombia, aún se desconocen aspectos básicos de su comportamiento fisiológico en función de la oferta ambiental, lo que ha ocasionado que se siembren de manera indistinta y sin criterios objetivos los dos genotipos con que se cuenta, en una gran diversidad de ambientes que, en algunos casos, ha llevado a fracasos en su explotación comercial (Jarma *et al.*, 2005).

Factores como la alta radiación en la época seca del Caribe húmedo colombiano, pueden ocasionar efectos deletéreos tales como foto inhibición y reducción del crecimiento en plantas no adaptadas. Con base en ello, las poblaciones juegan un papel importante al variar aspectos morfológicos y probablemente alterar la captación y uso eficiente de la radiación interceptada. Hunt (1982) indica que el crecimiento, en el contexto de plantas individuales, puede definirse como un aumento irreversible en el tiempo, y que estos cambios pueden ser en tamaño, forma y ocasionalmente en número. Generalmente los análisis de crecimiento se hacen con masa seca, y plantas que crecen en condiciones normales han mostrado en sus primeros estados la misma curva típica. No obstante, cambios en la masa seca (MS) total pueden variar debido al estado fisiológico de desarrollo (Ioslovich y Gutman, 2005), la relación fuente–demanda (Dayan *et al.*, 2004) y el uso eficiente de la radiación (Jarma *et al.*, 2006) entre otros, por lo que, para modelar el crecimiento, es necesario recurrir a herramientas capaces de comparar diferentes factores.

Olesen y Grevsen (2000) proporcionaron un modelo que incorpora los efectos del ambiente sobre el crecimiento y desarrollo del cultivo, y que incluye su aclimatación; se puede usar para predecir cosechas en diferentes condiciones ambientales. Sin embargo, aunque en muchos países se han utilizado los modelos de simulación de crecimiento en diversas especies, estas herramientas no han sido de uso frecuente en Colombia (Salazar *et al.*, 2008).

En ausencia de estrés, la acumulación de biomasa por el cultivo depende de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) incidente, la cual es función de la localidad, año, fecha de siembra y fenología del cultivo, y la RFA interceptada por el dosel (FLINT), la cual es función del índice de área foliar (IAF) y del coeficiente de extensión de lux, *k*. Según Monteith (1977), la relación entre biomasa y RFA incidente generalmente es descrita como uso eficiente de la radiación,

UER (g MJ⁻¹); así, el éxito de un modelo de crecimiento estará fundamentado en una adecuada descripción del IAF, el *k* y el UER (Ruiz y Bertero, 2008).

En este trabajo fue evaluada la hipótesis de que el aumento de la densidad de plantas por hectárea afectaría la interceptación y uso eficiente de la radiación de dos genotipos de estevia sembrados en diferentes épocas de siembra. Al considerar que los modelos de simulación generalmente son específicos para cada especie y propósito del mismo, este trabajo tuvo como objetivo establecer un modelo simple de distribución de biomasa de dos genotipos de estevia en función de la época de siembra y la población por m², bajo la oferta ambiental del Caribe colombiano.

Materiales y métodos

Localización y material experimental

El trabajo se realizó en la Universidad de Córdoba (Monte-ría, Colombia), a 13 msnm, 8°52' N y 76°48' W, temperatura anual de 28°C, 80% de humedad relativa, 1.200 mm de precipitación y brillo solar de 2.108,2 h año⁻¹ (Palencia *et al.*, 2006). En los semestres A y B de 2007, se sembraron los genotipos Morita 1 (M1) y Morita 2 (M2) en poblaciones de 25,00; 12,50 y 6,25 plantas/m², a distancias entre surcos y plantas de 0,4 x 0,4; 0,4 x 0,2 y 0,2 x 0,2 m, bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y arreglo factorial de 2 (épocas) x 2 (genotipos) x 3 (poblaciones). Durante la investigación no se presentaron factores externos limitantes; el riego se realizó por goteo y se mantuvo una lámina de humedad adecuada; el manejo agronómico del cultivo se basó en las recomendaciones técnicas del cultivo para el Caribe colombiano a excepción de las poblaciones que fueron precisamente objeto del presente estudio (Espitia *et al.*, 2008).

Muestreos del material vegetal

Para determinar MS, el primer muestreo se realizó 30 días después de siembra (dds) y 15 d después de la poda de formación; los muestreos posteriores se realizaron cada 7 d en tres plantas al azar hasta floración; en el primer experimento (E1) se efectuaron nueve muestreos entre febrero 20 y abril 17 de 2007, y en el segundo (E2) once, entre noviembre 20 de 2007 y enero 30 de 2008. El área foliar se determinó por el método gravimétrico en cada estrato del dosel y la MS en estufa a 70°C, hasta obtener peso constante. Adicionalmente se registró el brillo solar convertido a RFA mediante la metodología de Angström (1924). La Tab. 1 registra las principales variables climáticas presentadas durante cada época de evaluación.

TABLA 1. Promedios diarios de radiación fotosintéticamente activa RFA ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), temperaturas máximas y mínimas ($^{\circ}\text{C}$) y totales de precipitación y evaporación (mm), en dos épocas de siembra de estevia en el Caribe colombiano.

| Factor | Época 1 (Sem. A 2007) | | | Época 2 (Sem. B 2007) | | |
|--------------------|-----------------------|--------|--------|-----------------------|--------|--------|
| | Feb-07 | Mar-07 | Abr-07 | Nov-07 | Dic-07 | Ene-08 |
| RFA | 22,36 | 21,85 | 20,62 | 16,87 | 18,66 | 19,32 |
| Temperatura máxima | 34,68 | 33,85 | 32,79 | 31,41 | 32,42 | 33,88 |
| Temperatura mínima | 23,84 | 24,81 | 24,63 | 23,75 | 23,47 | 23,85 |
| Precipitación | 0 | 78,00 | 0 | 22,80 | 53,30 | 8,80 |
| Evaporación | 117,30 | 152,00 | 113,30 | 101,10 | 128,00 | 131,06 |

Componentes del modelo

Para cada época, genotipo y población se usó un modelo matemático determinístico que calculó la tasa de acumulación diaria de MS (ecuación 1) a partir de RFA, fracción de luz interceptada por el follaje (*FLINT*) y UER.

$$\delta W_t = \text{RFA}_t \text{FLINT}_t \text{UER} \quad (1)$$

donde δW_t es el incremento diario del crecimiento ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$), RFA_t es la radiación fotosintéticamente activa incidente en el tiempo t ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), FLINT_t es la fracción de luz interceptada por el cultivo en el tiempo t y UER es el uso eficiente de la radiación medido en g MJ^{-1} de RFA interceptada.

UER representa la suma de procesos de fotosíntesis y respiración, por lo que cada factor que afecte estos dos procesos lo afectará consecuentemente. FLINT_t , un coeficiente adimensional expresado como $1 - e^{-k \text{IAF}}$, depende del k y del IAF, el cual es estimado a partir del área foliar específica (AFE) en $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ (Lee y Heuvelink, 2003; Awal *et al.*, 2004).

La estimación de los parámetros k y UER se realizó por el método de optimización no lineal usando SOLVER de Excel®. Este método iterativo minimiza la suma de cuadrados de la diferencia entre el valor observado y el valor simulado (Carranza *et al.*, 2008).

Simulación

La simulación es la integración numérica de la tasa de crecimiento diario del cultivo. Con el propósito de obtener la masa acumulada en el día t (W_t), se usó el método de Euler con un $\Delta t = 1 \text{ d}$ (ecuación 2). Las unidades de W_t son $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$

$$W_t = W_{t-1} + \delta W_t \Delta t \quad (2)$$

Modelo de distribución de MS

Se designaron como coeficientes de distribución α_o las proporciones de la MS que se asignaron a hojas y tallos.

La MS de cada órgano se simuló con la ecuación de Euler (ecuación 3):

$$W_{o_t} = W_{o_{t-1}} + \alpha_o \delta W_t \Delta t \quad (3)$$

donde W_{o_t} es la MS total de las hojas (W_h) o del tallo (W_t) en el día t , expresada en $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$; $W_{o_{t-1}}$ es la MS total de cada órgano en el día $t-1$, expresada en $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$; α_o es el coeficiente de distribución de MS para hojas (α_h) o tallos (α_t); δW_t es la tasa de crecimiento diario de la MS total, expresada en $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ y Δt es el incremento a través del tiempo (1 d). La estimación del parámetro α_o se realizó mediante el programa SOLVER de Excel.

Análisis de la información

Los valores de k , UER, α_h y α_t se analizaron por Anova con el programa Statistical Analysis System (SAS)® versión 9.1 para Windows; como fuentes de variación se consideraron épocas, genotipos, poblaciones y sus interacciones. El efecto de los factores individuales se analizó con la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$ y $P \leq 0,01$). Aunque no se presentaron, las interacciones que resultaran significativas se descompondrían numéricamente a través de un Anova con el estadístico F (5%). El análisis de la masa acumulada en el tiempo (W_t) se efectuó con base en las gráficas obtenidas al aplicar el modelo de Euler.

Resultados y discusión

Radiación fotosintéticamente activa

La Fig. 1 registra la RFA de cada época; en E1 se observó un promedio de $21,61 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ y en E2 de $18,28 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Las diferencias en los ciclos de cultivo podrían estar explicadas porque la mayor radiación en E1, induciría temperaturas más altas (Tab. 1), con efectos sobre la velocidad de reacción enzimática (ley de Van't Hoff), que derivaría en un crecimiento más acelerado; otros efectos de la RFA entre épocas se verán reflejados en el IAF y UER, pero se discutirán más adelante. Aunque para estevia como especie

subtropical y otras especies tropicales, estudios que relacionen efectos combinados de radiación y temperaturas son escasos (Rondón *et al.*, 2007), diversos trabajos en especies

hortícolas han demostrado correlación lineal positiva entre temperatura y precocidad (Real-Rosas *et al.*, 2002; Ortegón *et al.*, 2006).

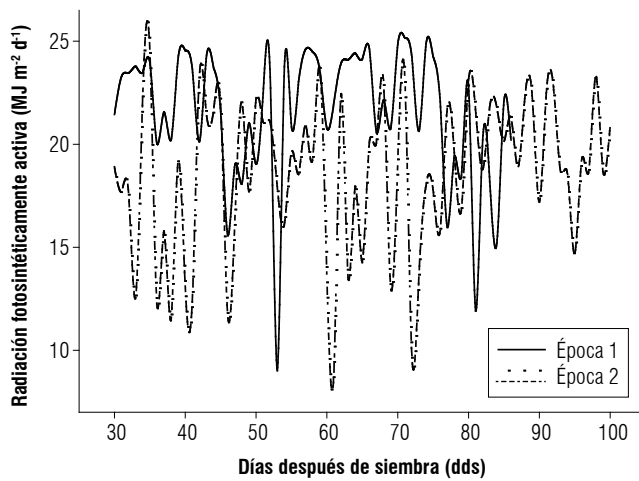


FIGURA 1. Radiación fotosintéticamente activa durante dos épocas de evaluación de estevia en el Caribe colombiano (Época 1 = febrero - abril 2007; Época 2 = noviembre 2007 - enero 2008).

Fracción de luz interceptada

Las Fig. 2.1 y 2.2 registran respectivamente el comportamiento del IAF y la FLINT en E1 y E2; en todos los casos, los registros de M2 fueron significativamente superiores a los de M1.

Aunque no se muestran de manera independiente al genotipo o la época, a los 100 dds, los mayores y menores valores promedio del IAF se observaron al establecer 25,00 y 6,25 plantas/m² (1,46 vs. 0,37, respectivamente), de manera coincidente con trabajos que demuestran correlación lineal positiva del IAF con la población (Chaimsohn, 2006; Ruiz y Bertero, 2008); esto probablemente sea consecuencia de una distribución más equitativa del dosel cuando los espacios entre surcos son más angostos y hay un mayor número de hojas (datos no mostrados). Sin embargo, es importante considerar que, aunque la interceptación de la radiación solar

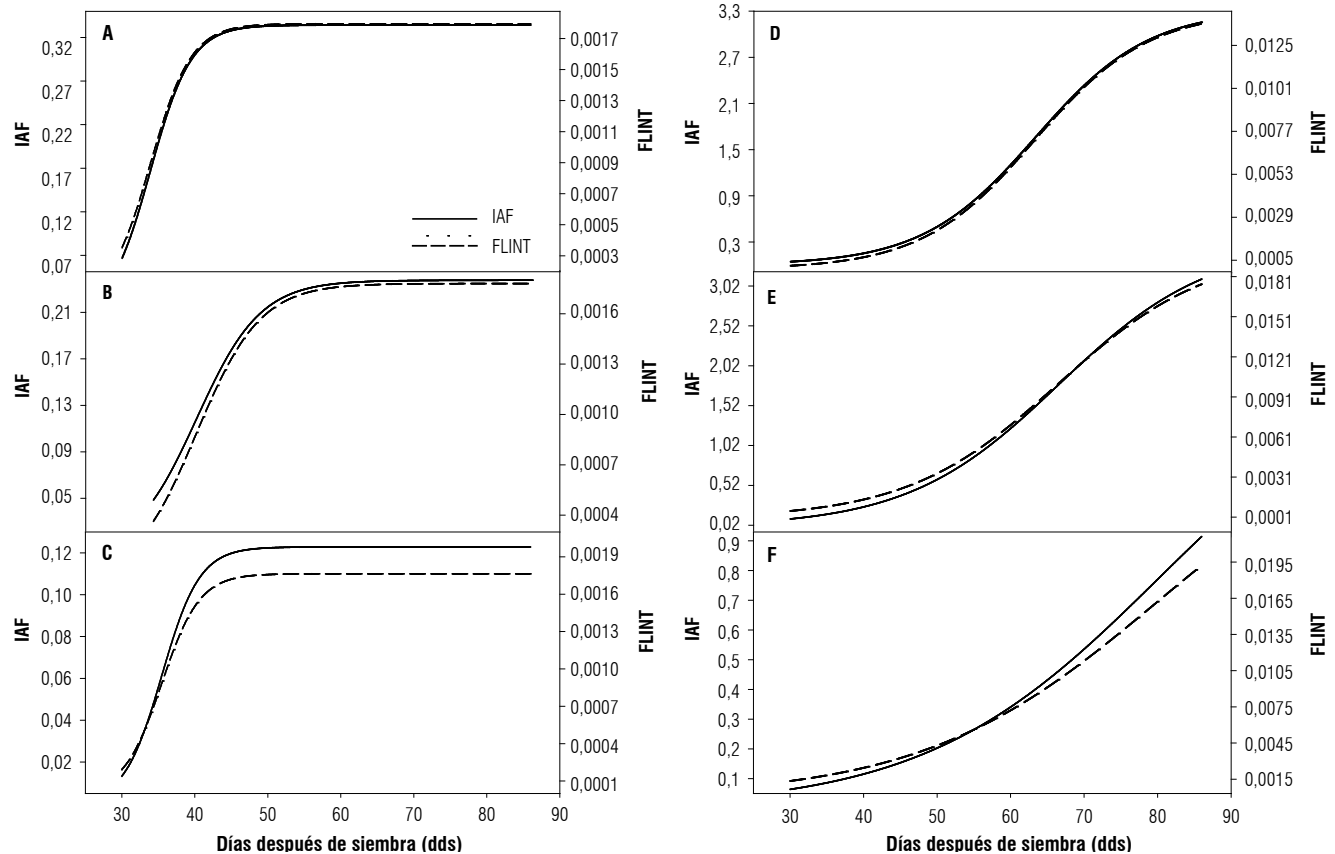


FIGURA 2.1 Índice de área foliar (IAF) por dos genotipos de estevia cultivados entre febrero y abril de 2007, bajo tres densidades de población (A, B y C = Morita 1 a 25,00; 12,50 y 6,25 plantas/m², respectivamente; D, E y F = Morita 2 a 25,00; 12,50 y 6,25 plantas/m², respectivamente).

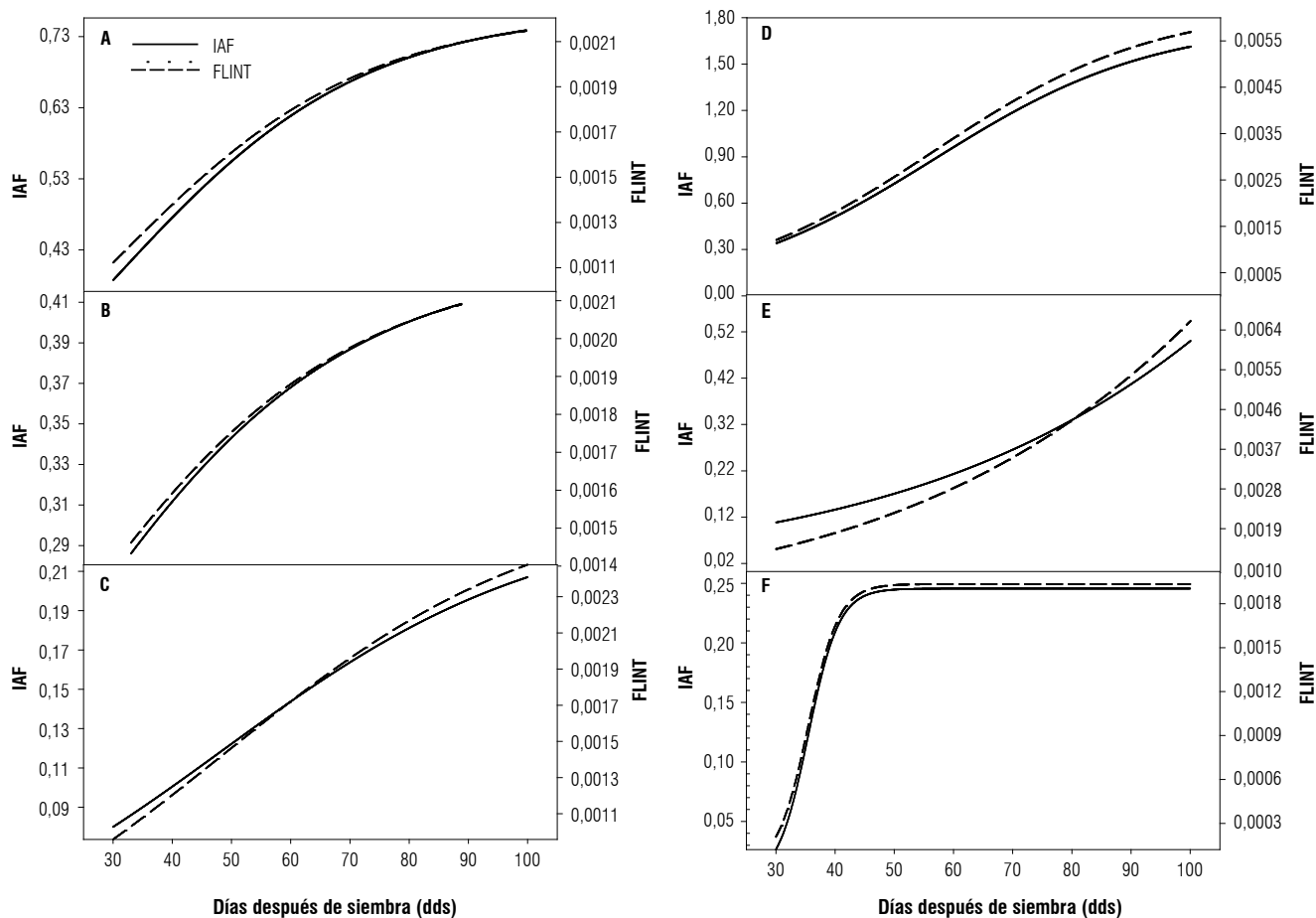


FIGURA 2.2 Fracción de luz interceptada (FLINT) por dos genotipos de estevia cultivados entre noviembre de 2007 y enero de 2008, bajo tres densidades de población (A, B y C = Morita 1 a 25,00; 12,50 y 6,25 plantas/m², respectivamente; D, E y F = Morita 2 a 25,00; 12,50 y 6,25 plantas/m², respectivamente).

incidente que asegura las máximas tasas de crecimiento del cultivo se encuentra cuando el IAF aumenta hasta el valor crítico, un excesivo autosombreamiento podría ocasionar decrecimientos en la tasa fotosintética media por unidad de área foliar con detrimentos en la biomasa total por planta. El IAF crítico se presenta cuando se intercepta el 95% de la RFA incidente (Andrade *et al.*, 1993), por lo que se podría concluir que, dados los valores observados de la FLINT, el IAF crítico de estevia estuvo lejos de ser hallado en la presente investigación.

Por otra parte, los resultados evidencian un comportamiento diferencial del IAF de los genotipos en función de la radiación a los 100 dds, tal como lo reportó Jarma *et al.* (2005). Al pasar de E1 a E2, M2 aumentó el IAF en un 95% en tanto que M1 lo redujo en 45%. Esto podría estar explicado en parte porque M1 sería más eficiente en reducir su fotorrespiración o aumentar su fotosíntesis a radiaciones menores como las de E2 (menor temperatura interna de la hoja), como lo proponen Taiz y Zeiger (2006), traduciendo

esta ventaja en mayor desarrollo de su IAF (aunque esto no conducirá necesariamente a mayores rendimientos de masa seca enviada a las hojas, como se discutirá más adelante). Los máximos valores de IAF observados fueron de 3,15 para M2 (E1) y 0,73 para M1 (E2), que estarían dentro del rango de IAF reportados para estevia, 0,35 (Lima-Filho, 2004) a 4,83 (Fronza y Folegatti, 2003).

Tal como se reporta para otras especies hortícolas, la FLINT siguió una tendencia paralela al IAF (Carranza *et al.*, 2008), aunque independientemente a la población, estos valores fueron inferiores para M1 (0,001) respecto a M2 (0,01). En Colombia no existen reportes de FLINT en estevia, y por ello estos resultados, que pueden considerarse muy bajos respecto a otras especies, no tienen referencias; el rango de luz interceptada por el dosel demuestra muy baja eficiencia para estos genotipos en las condiciones del estudio. Valores de FLINT en otros cultivos (0,6 en brócoli o 0,9 en repollo al final del ciclo) han sido reportados por Carranza *et al.* (2008).

Coefficiente de extinción, uso eficiente de la radiación y distribución de biomasa

No se presentaron efectos significativos de las interacciones para ninguna de las variables (k , UER, αh y αt), aunque sí para factores individuales (Tab. 2). El coeficiente de extinción fue afectado por la población, el UER por la época ($P \leq 0,01$) y los αh y αt por la época y el genotipo ($P \leq 0,05$).

Coefficiente de extinción (k)

Aunque no se tienen referencias para estevia, los valores observados de k , que oscilaron entre 0,03 (E2, M2, 6,25 plantas/m²) y 0,21 (E1, M2, 25 plantas/m²), pueden considerarse como bajos respecto a cultivos como maíz (0,29), papa (0,45), frijón (0,55), palma de aceite (0,66) y banano (0,68) (Rodríguez, 2009).

La Tab. 3 muestra las diferencias del k al aumentar la población ($P \leq 0,05$); el mayor valor de k (0,15), al establecer 25 plantas/m², sugiere que para esta población se presenta mejor interceptación de RFA como consecuencia directa de un mayor valor del IAF; esto podría estar explicado por un mejor ordenamiento espacial del dosel respecto a distancias rectangulares o bajas poblaciones que no alcanzan el cierre de surcos. Tendencias similares de au-

mento del k en función de la población se han reportado en café (Castillo *et al.*, 1996), tomate (Heuvelink, 1996), papa (Cabezas y Corchuelo, 2005) y otras especies (Flenet *et al.*, 1996; Ruíz y Bertero, 2008). Sin embargo, algunos autores han encontrado decrecimientos del k al aumentar la población en cebada (Kemanian *et al.*, 2004), brócoli (Francescangeli *et al.*, 2006) y maíz (Westgate *et al.*, 1997), aunque estos últimos indicaron que el decrecimiento del k al aumentar la población no se afectó por la distancia entre surcos antes del cierre del dosel. Es sabido que, en general, genotipos de una misma especie con valor bajo de k , pueden cultivarse a densidades más altas porque, a pesar del hacinamiento en que crecen estas plantas, las estructuras de sus doseles y disposición de sus hojas logran distribuir mejor la luz incidente.

Uso eficiente de la radiación (UER)

El valor promedio estimado de UER (2,02 g MJ⁻¹), puede considerarse como normal dentro del rango típico de cultivos C3 (Vieira *et al.*, 2009); este valor estaría por debajo de trigo (2,70 g MJ⁻¹, Abbate *et al.*, 1997) y cebada (2,63 g MJ⁻¹, Bingham *et al.*, 2007), similar a maní (2,0 g MJ⁻¹, Kiniry *et al.*, 2005) y pasto raygrass (2,01 g MJ⁻¹, Akmal y Janssens, 2004) y mayor que guisante (1,52 g

TABLA 2. Significancia estadística de variables ecofisiológicas de estevia en función de la época, el genotipo y la población por hectárea. Montería, Córdoba, 2007.

| Parámetro | Fuente de variación | | | | Estadísticos | |
|---|---------------------|----|----|------|---------------------|-------|
| | E | G | P | cv | CME | MEDIA |
| Coefficiente de extinción (k) | NS | NS | * | 24,8 | 43·10 ⁻⁵ | 0,08 |
| Uso eficiente de la luz UER | ** | NS | NS | 0,05 | 1·10 ⁻⁷ | 2,02 |
| Coefficiente de distribución de MS en el tallo (αh) | * | * | NS | 7,3 | 17·10 ⁻³ | 0,57 |
| Coefficiente de distribución de MS en la hoja (αt) | * | * | NS | 9,8 | 17·10 ⁻³ | 0,42 |

E, época; G, genotipo; P, Población; cv, coeficiente de variación; CME, cuadrado medio del error; NS, no significativo; * significativo ($P \leq 0,05$); ** altamente significativo ($P \leq 0,01$).

TABLA 3. Comparación de medias de parámetros fisiológicos de estevia en función de la época, el genotipo y la población por hectárea. Montería, Córdoba, 2007.

| Parámetro | Época | | Genotipo | | | Población (plantas/m ²) | |
|---------------------------|--------|--------|----------|--------|--------|-------------------------------------|--------|
| | E1 | E2 | M1 | M2 | 6,25 | 15,50 | 25,00 |
| K | 0,09 a | 0,07 a | 0,07 a | 0,09 a | 0,04 b | 0,05 b | 0,15 a |
| UER (g MJ ⁻¹) | 2,04 a | 1,99 b | 2,02 a | 2,02 a | 2,02 a | 2,02 a | 2,02 a |
| α Tallo | 0,48 a | 0,65 b | 0,62 a | 0,51 b | 0,60 a | 0,58 a | 0,52 a |
| α Hoja | 0,51 a | 0,34 b | 0,37 a | 0,48 b | 0,39 a | 0,41 a | 0,47 a |

E1, época 1; E2, época 2; M1, Morita 1; M2, Morita 2.

Promedios con letras distintas dentro de un mismo factor y parámetro indican diferencia significativa según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

MJ⁻¹, O'Connell *et al.*, 2004) y soya (1,2-2,0 g MJ⁻¹, Egli y Bruening, 2000).

El UER fue mayor en 0,05 g MJ⁻¹ en E1 respecto a E2 (Tab. 3); en E1 se presentaron igualmente mayores niveles de RFA, confirmando lo propuesto por Jarma *et al.* (2005): que M1 y M2 responden positiva pero diferencialmente en la producción de biomasa al aumentar la oferta de luz. Probablemente, los mayores valores de tejido foliar por unidad de área observados en E1, principalmente de M2, contribuyan a explicar estas diferencias que traerían como consecuencia mayores tasas fotosintéticas respecto a E2. Aunque en pimienta, Vieira *et al.* (2009) no encontraron efectos de la época de siembra sobre el UER, resultados similares a este estudio han sido reportados para otros cultivos (Squire, 1990; Gower *et al.*, 1999). Es importante considerar que estevia es una planta perenne subtropical, y que para este caso el UER se estimó con base en la biomasa del dosel; esto puede ser relevante debido a que el UER en cultivos perennes es más complejo de interpretar respecto a cultivos anuales, ya que la biomasa producida no solo depende de la eficiencia en la conversión de la RFA interceptada, si no que también desempeña un papel fundamental la removilización de reservas acumuladas, probablemente en raíz (Guzmán *et al.*, 2007).

Por otra parte, aunque en E1 los niveles de radiación fueron altos, al parecer no afectaron negativamente la fotosíntesis, y probablemente la radiación difusa aprovechable por el dosel sería mayor que en E2. En este sentido, Ruiz y Bertero (2008) indican que el UER podría incrementarse con un aumento en la fracción difusa, ya que se eleva la proporción de área fotosintética que está operando a niveles de radiación no saturantes.

Por último, la temperatura también ayudaría a explicar las diferencias en el UER entre épocas. Aunque existirá un punto de saturación por altas temperaturas no determinado en este trabajo, la diferencia de 1,2°C/d a favor de E1 podría mejorar la eficiencia en el uso de la radiación respecto a E2, tal como se ha reportado para otros cultivos como colza de invierno (Justes *et al.*, 2000) y alfalfa (Brown *et al.*, 2006).

Distribución de masa seca

Los resultados indicaron que la eficiencia en el envío de asimilados hacia la hoja fue significativamente mayor ($P \leq 0,05$) en E1 (51% respecto a 34% de E2), sugiriendo que probablemente la alta demanda de asimilados de las hojas en esta época explicaría las diferencias a favor del IAF y UER, como fue discutido anteriormente, y que las

demandas del tallo no tendrían mayor efecto sobre este parámetro.

Al considerar el genotipo, la distribución de asimilados en M2 fue significativamente mayor hacia las hojas ($P \leq 0,05$), respecto a M1. Esto evidenciaría que la eficiencia de M2 en producir casi tres veces más tejido asimilatorio por unidad de área de suelo en E1 (3,15 vs. 0,33 de M1) sería una consecuencia de su eficiencia en el envío de MS para el desarrollo de hojas, independientemente de la época o la población, coincidiendo con lo reportado por Jarma *et al.* (2005). Aunque existen escasas referencias de coeficientes de distribución de biomasa en estevia, algunos trabajos con esta especie concluyeron que, inicialmente, la biomasa se localiza de manera prioritaria en hojas y posteriormente en tallos, llegando a proporciones de 3 a 1 (Lima-Filho, 2004). Tendencias similares reportaron Jarma *et al.* (2005), aunque las diferencias a favor del tallo (2 a 1) fueron evidentes a partir de los 90 d.

Los resultados en las condiciones del presente trabajo indicaron que en E1, M1 envía igual proporción de biomasa a tallos y hojas bajo cualquier población (Fig. 3.1 A, B y C), registrando valores máximos de 4,1 g/planta; M2 muestra una tendencia similar hasta 60 d, pero posteriormente la distribución hacia hojas es mayor, manteniéndola hasta cosecha y alcanzando valores de 19 g/planta; esto explicaría las diferencias de esta variable entre épocas, ya que en la E2, aunque la MS de M2 es el 53% respecto a sí mismo en E1 (Fig. 3.2), esta MS es significativamente más alta en un 55% que la registrada por M1, aunque la tendencia de la distribución sea similar.

Los resultados de biomasa total observados para E1 confirmarían que, en estevia, el incremento de la intensidad de luz puede aumentar el crecimiento vegetativo (Midmore y Rank, 2002), y que intensidades menores lo reducirían (Jarma *et al.*, 2006), aunque, además de los efectos sobre el ciclo productivo útil, habría que considerar el efecto del genotipo y el ambiente, que también desempeñarían un papel definitivo en la producción de biomasa (Jarma *et al.*, 2005).

Conclusiones

Las diferencias observadas en la RFA entre épocas (3 MJ m⁻² d⁻¹ a favor de E1), así como el efecto del genotipo fueron los factores más determinantes en las respuestas de las variables evaluadas en el presente estudio. El IAF fue afectado de manera diferencial, siendo un 95% mayor para M2 en la E1. Aunque la FLINT siguió la misma tendencia del IAF, los

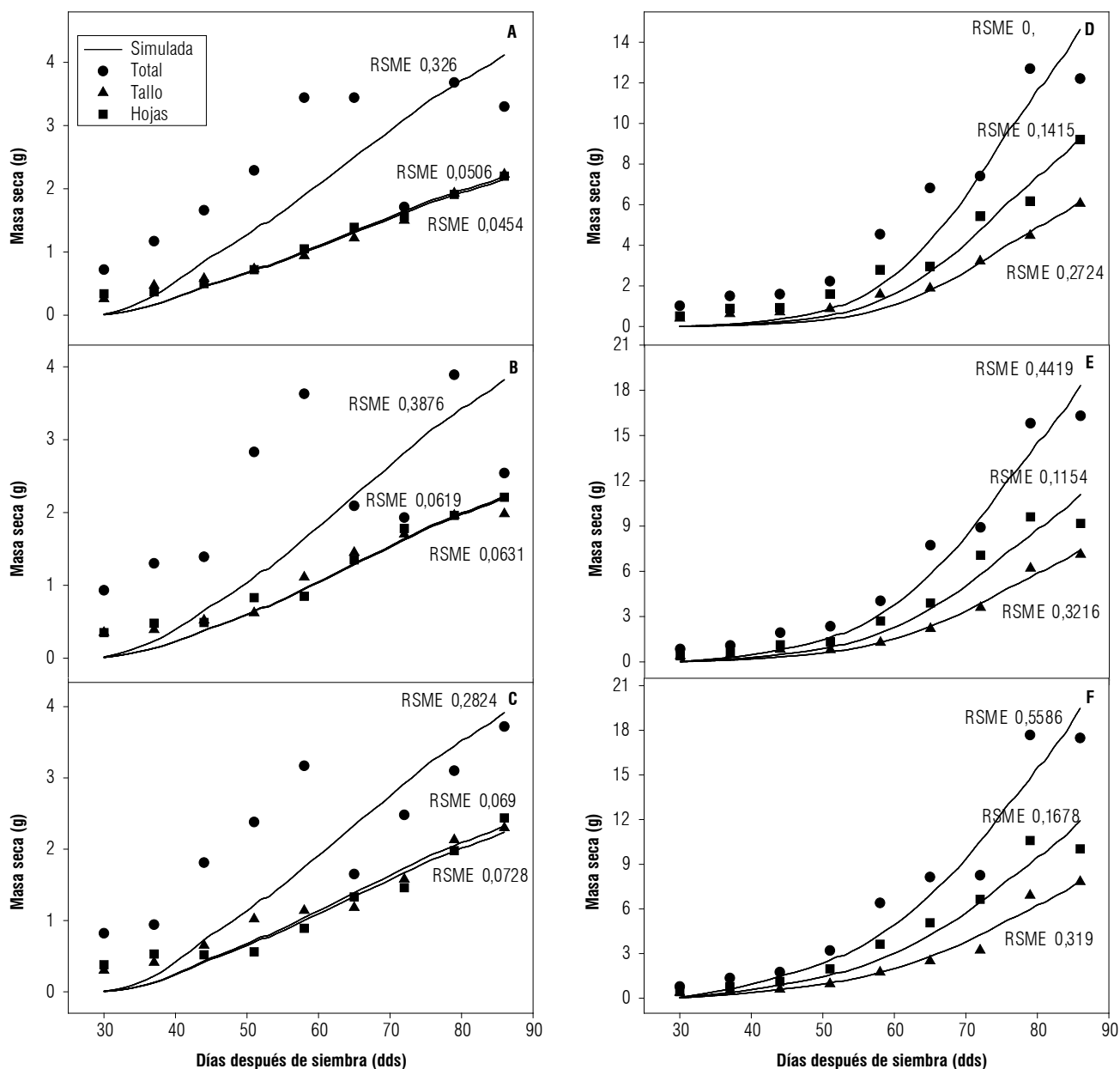


FIGURA 3.1 Masa seca (g) de dos genotipos de estevia cultivados entre febrero y abril de 2007 bajo tres densidades de población (A, B y C = Morita 1 a 25,00; 12,5 y 6,25 plantas/m², respectivamente; D, E y F = Morita 2 a 25,00; 12,50 y 6,25 plantas/m², respectivamente).

valores observados para esta variable, y consecuentemente para el k , pueden considerarse como bajos al compararlos con otras especies de crecimiento similar.

El UER fue significativamente más alto en E1, diferencia que estaría explicada por el mayor desarrollo del tejido asimilatorio de M2 respecto a M1. Este comportamiento indica una mayor eficiencia de M2 en el aprovechamiento de la RFA en E1, el cual estaría demostrado por una mejor distribución de biomasa hacia las hojas, cuyos valores por planta pueden estar entre 11,1 y 11,9 g (60% de la biomasa

total del dosel de la planta), al establecer entre 6,25 y 12,50 plantas/m², respectivamente.

Literatura citada

- Abbate, P.E., F.H. Andrade, J.P. Culot y P.S. Bindrabán. 1997. Grain yield in wheat: effects of radiation during spike growth period. *Field Crops Res.* 54, 245-257.
- Akmal, A. y M.J. Janssens. 2004. Productivity and light use efficiency of perennial ryegrass with contrasting water and nitrogen supplies. *Field Crops Res.* 88, 143-155.

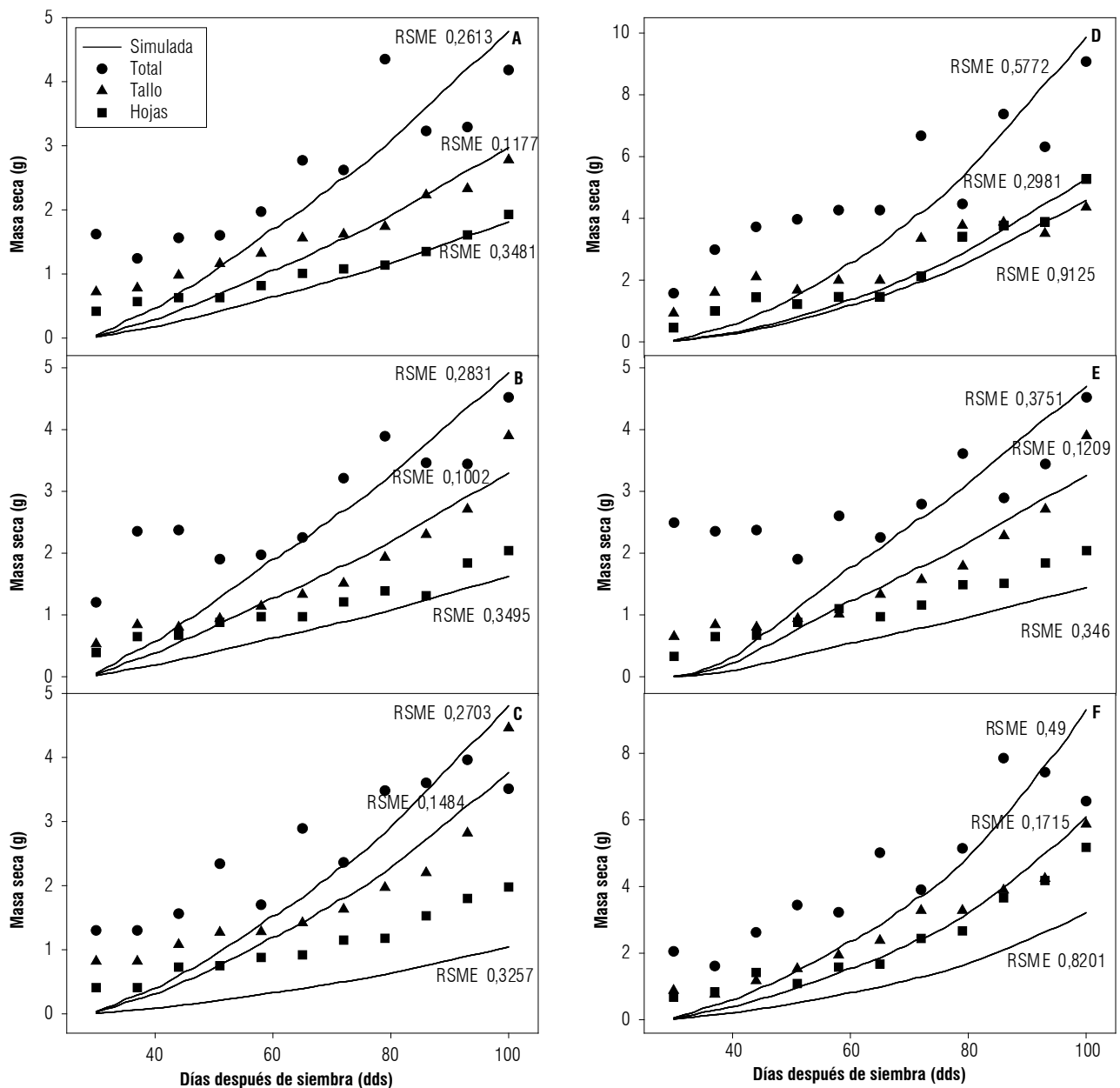


FIGURA 3.2 Masa seca (g) de dos genotipos de estevia cultivados entre noviembre de 2007 y enero de 2008 bajo tres densidades de población (A, B y C = Morita 1 a 25,00; 12,50 y 6,25 plantas/m², respectivamente; D, E y F = Morita 2 a 25,00; 12,50 y 6,25 plantas/m², respectivamente).

Andrade, F., S.A. Uhart y M.I. Frugone. 1993. Intercepted radiation at flowering and kernel number in maize: shade vs. Plant density effects. *Crop Sci.* 33, 482-485.

Awal, M.A., I. Wan, J. Endan y M. Haniff. 2004. Determination of specific leaf area and leaf area-leaf mass relationship in oil palm plantation. *Asian J. Plant Sci.* 3(3), 264-268.

Bingham, I., J. Blake, M.J. Foulkes y J. Spink. 2007. Is barley yield in the UK sink limited? I. Post-anthesis radiation interception, radiation-use efficiency and source-sink balance. *Field Crops Res.* 101, 198-211.

Brown, H., D. Moot y E. Teixeira. 2006. Radiation use efficiency and biomass partitioning of lucerne (*Medicago sativa*) in a temperate climate. *Eur. J. Agron.* 56(4), 319-390.

Cabezas, M. y G. Corchuelo. 2005. Estimación de la interceptación de la radiación solar en papa criolla (*Solanum phureja* Juz. et Buk.) en tres localidades colombianas. *Agron. Colomb.* 23(1), 62-73.

Carranza, C., O. Lancho, D. Miranda, M. Salazar y B. Chaves. 2008. Modelo simple de simulación de distribución de masa seca en brócoli (*Brassica sp.*) variedad Coronado y repollo (*Brassica oleracea*) híbrido Delus cultivados en la Sabana de Bogotá. *Agron. Colomb.* 26(1), 23-31.

Castillo, E., A. Jaramillo, J. Arcila y J. Sanabria. 1996. Coeficientes de extinción de la radiación fotosintéticamente activa en *Coffea arabica* L. *Atmósfera* 24, 65-70.

Chaimsohn, F. 2006. Producción y calidad del palmito al natural, en función de la población, del arreglo de plantas y del tipo de

- fertilización. Tesis de doctorado. Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Dayan, E., E. Presnov y M. Fuchs. 2004. Prediction and calculation of morphological characteristics and distribution of assimilates in the ROSGRO model. *Math. Comput. Simul.* 65(1-2), 101-116.
- Egli, D. y W. Bruening. 2000. Potential of early-maturing soybean cultivars in late plantings. *Agron. J.* 92, 532-537.
- Espitia, M., R. Montoya y A. Jarma. 2008. Stevia en el Caribe colombiano. Universidad de Córdoba, Montería, Colombia.
- Flenet, F., J. Kiniry, J. Board, M. Westgate y D. Reicosky. 1996. Row spacing effects on light extinction coefficients of corn, sorghum, soybean, and sunflower. *Agron. J.* 88(2), 185-190.
- Francescangeli, N., M. Sangiacomo y H. Martí. 2006. Effects of plant density in broccoli on yield and radiation use efficiency. *Scientia Hort.* 110, 135-143.
- Fronza, D. y M. Folegatti. 2003. Water consumption of the stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) crop estimated through microlysimeter. *Sci. Agric.* 60(3), 595-599.
- Gower, S., C. Kucharik y J. Norman. 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, f_{PAR} and net primary production of terrestrial ecosystems. *Rem. Sens. Environ.* 70, 29-51.
- Guzmán, C., M. del C. Spada y J.C. Mombelli. 2007. Eficiencia del uso de la radiación de cultivares de alfalfa de distinto grado de reposo en Córdoba, Argentina. En: APPA; ALPA (Cusco, Perú). Sitio Argentino de Producción Animal, http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas_cultivadas_alfalfa/83-Guzman-radiacion.pdf; consulta: marzo de 2010.
- Heuvelink, E. 1996. Dry matter partitioning in tomato: validation of a dynamic simulation model. *Ann. Bot.* 77, 71-80.
- Hunt, R. 1982. Plant growth curves. The functional approach to plant growth analysis. Edward Arnold Publishers, London.
- Ioslovich, I. y P. Gutman. 2005. On the botanic model of plant growth with intermediate vegetative-reproductive stage. *Theor. Pop. Biol.* 68(3), 147-156.
- Jarma, A. 2008. Estudios de adaptación y manejo integrado de stevia (*Stevia rebaudiana* Bert.): nueva alternativa agroindustrial del Caribe colombiano. Una revisión. *Rev. Colomb. Cienc. Hortíc.* 2(1), 109-120.
- Jarma, A., T. Rengifo y H. Aramendiz. 2005. Aspectos fisiológicos de stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) en el Caribe colombiano. I. Efecto de la radiación incidente sobre el área foliar y la distribución de biomasa. *Agron. Colomb.* 23(2), 207-216.
- Jarma, A., T. Rengifo y H. Aramendiz. 2006. Aspectos fisiológicos de stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) en el Caribe colombiano. II. Efecto de la radiación incidente sobre los índices de crecimiento. *Agron. Colomb.* 24(1), 38-47.
- Justes, E., P. Denoroy, B. Gabrielle y G. Gosse. 2000. Effect of crop nitrogen status and temperature on the radiation use efficiency of winter oilseed rape. *Eur. J. Agron.* 13(2-3), 165-177.
- Kemarian, A., C. Stöckle y D. Huggins. 2004. Variability of barley radiation-use efficiency. *Crop Sci.* 44, 1662-1672.
- Kiniry, J., C. Simpson, A. Schubert y J. Reed. 2005. Peanut leaf area index, light interception, radiation use efficiency, and harvest index at three sites in Texas. *Field Crops Res.* 91, 297-306.
- Lee, J. y E. Heuvelink. 2003. Simulation of leaf area development based on dry matter partitioning and specific leaf area for cut chrysanthemum. *Ann. Bot.* 91, 319-327.
- Lima-Filho, O. 2004. Análise quantitativa do crescimento da estévia. Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados, MS, Brasil.
- Midmore, D. y A. Rank. 2002. A new rural industry - Stevia - to replace imported chemical sweeteners. Rural Industries Research and Development Corporation (RIRDC), Kingston, Australia.
- Monteith, J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 281, 277-294.
- O'Connell, M., G. O'Leary, D. Whitfield y D. Connor. 2004. Interception of photosynthetically active radiation and radiation-use efficiency of wheat, field pea and mustard in a semi-arid environment. *Field Crops Res.* 85, 111-124.
- Olesen, J. y K. Grevsen. 2000. A simulation model of climate effects on plant productivity and variability in cauliflower (*Brassica oleracea* L. *botrytis*). *Scientia Hort.* 83, 83-107.
- Ortegón, A., F. Díaz, J. González e I. Garza. 2006. La temperatura en la etapa reproductiva del cultivo de canola (*Brassica napus* L.). *Agric. Téc. Méx.* 32(3), 259-265.
- Palencia, G., T. Mercado y E. Combatt. 2006. Estudio agrometeorológico del departamento de Córdoba. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba. Gráficas del Caribe, Montería, Colombia.
- Real-Rosas, M.A., A. Lucero-Arce, M. Toyota, R. López-Aguilar y B. Murillo-Amador. 2002. Variedades precoces de brécol para la diversificación agrícola en zonas áridas. *INCI* 27(5), 247-251.
- Rodríguez, W. 2001. Capítulo VIII. Interceptación de la luz y fotosíntesis del dosel. En: Universidad Técnica Federico Santa María, <http://www.mgta.usm.cl/assets/Uploads/CaptuloInterceptacinLuzfotosntesis.pdf>; consulta: marzo de 2010.
- Rondón, J., L. Zaidan, M. Domingos, C. Barbero y R. Figueiredo. 2007. Vegetative responses to temperature and photoperiod in saplings of brazilwood (*Caesalpinia echinata* Lam., Leguminosae). *Braz. J. Plant Physiol.* 18(4), 467-474.
- Ruiz, R. y H. Bertero. 2008. Light interception and radiation use efficiency in temperate quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars. *Eur. J. Agron.* 29, 144-152.
- Salazar, M., J. Jones, B. Chaves y A. Cooman. 2008. A model for the potential production and dry matter distribution of Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). *Scientia Hort.* 115, 142-148.
- Squire, G. 1990. The physiology of tropical crop production. CAB International, Wallingford, UK.
- Taiz, L. y Zeiger, E. 2006. Plant physiology. 4a ed. Sinauer Associates Inc., Sunderland, MA.
- Vieira, M., J. De Melo-Abreu, M. Ferreira y A. Monteiro. 2009. Dry matter and area partitioning, radiation interception and radiation-use efficiency in open-field bell pepper. *Scientia Hort.* 121, 404-409.
- Westgate, M., F. Forcella, D. Reicosky y J. Somsen. 1997. Rapid canopy closure for maize production in the northern US corn belt: radiation-use efficiency and grain yield. *Field Crops Res.* 49, 249-258.