

# Rendimiento energético de un cultivo de caña de azúcar\*

C. VARLET GRANCHER\*\*, RAYMOND BONHOMME\*\*, P. LEAL CASTANEDA\*\*\*

## ABSTRACT

*Efficiency of energy conversion as related to incident global radiation for a crop of sugar cane has been studied. The efficiency of energy conversion is divided in two components:*

*— efficiency of biological processes of photosynthesis and respiration,*

*— efficiency of trapping incident solar energy.*

*For a vegetative period of 580 days the efficiency of energy conversion is equal to 0.0145; the efficiency of biological processes accounts for 0.038 and the efficiency of trapping accounts for 0.386. — The authors*

## Introducción

La fotosíntesis convierte la energía solar en energía química potencial contenida en la materia seca acumulada por la cubierta vegetal en el curso de su desarrollo. El rendimiento energético de un cultivo ( $\epsilon$ ) se define por la relación entre la energía total almacenada  $M$  y la energía incidente  $G$ , durante un intervalo de tiempo y para una misma superficie:

Numerosos autores (1, 5, 6, 9), han estudiado las variaciones de  $\epsilon$  a diferentes estadios de la vegetación y en diferentes cultivos. Realmente, el rendimiento del cultivo con relación a la energía incidente depende:

— del rendimiento con relación a la energía solar absorbida:

$$\epsilon_p = \frac{M \text{ (energía de la materia seca producida)}}{G' \text{ (energía útil absorbida por el cultivo)}}$$

— de la eficacia de intercepción de la radiación solar por la vegetación:

$$\epsilon_i = \frac{G' \text{ (energía útil absorbida)}}{G \text{ (energía incidente)}}$$

Es posible escribir:  $\epsilon = \epsilon_p \times \epsilon_i$ .

En este trabajo se han estudiado las variaciones de estos rendimientos para un cultivo de caña de azúcar en el curso del tiempo y en función de la superficie foliar, ya que de ella depende a la vez la intercepción de la radiación y la producción de materia orgánica.

## Materiales y métodos

Las medidas fueron realizadas en la finca Duclos (16°N) en Guadalupe. La variedad estudiada fue la 'PR 1059', plantada el 8 de junio de 1973 (siembra empleando cañas enteras con espaciamientos entre surcos de 1,60 m) en una parcela de 2000 m<sup>2</sup>.

La primera cosecha tuvo lugar el 2 de mayo de 1974 y la segunda el 15 de enero de 1975; los rendimientos fueron los siguientes: la caña molida fue de 109,4 t/ha y 110,6 t/ha de peso fresco para la primera y la segunda cosecha respectivamente.

\* Recibido para la publicación el 14 de noviembre de 1975

\*\* I.N.R.A. Bioclimatologie, Petit-Bourg, Guadeloupe, Antilles françaises

\*\*\* Estación Experimental de la Caña de Azúcar, Jovellanos, Cuba

La densidad promedio de tallos por hectárea fue de 120.000 para la caña planta y de 100.000 para el retoño.

El índice foliar  $f$  (superficie de las hojas por unidad de superficie de suelo) fue calculado a partir de la correlación entre el producto longitud ( $L$ ) x ancho ( $l$ ) y la superficie ( $S$ ) de cada hoja:

$$S \text{ cm}^2 = 0,776 (L \text{ cm} \times l \text{ cm}) - 0,2 \quad \text{con } r = 0,99$$

La evolución de la materia seca de las partes aéreas (hojas + tallos) o la materia seca total se obtuvo por el muestreo de cuarenta o sesenta plantas en el campo en el curso de su desarrollo. Las muestras se pasaron por la estufa a  $60^\circ\text{C}$  durante 24 horas.

Las medidas de irradiación energética debidas a la radiación global ( $G$ ), radiación difusa del cielo y las nubes ( $D$ ), radiación reflejada por el conjunto suelo-cultivo ( $E$ ), fueron realizadas por tres piranómetros de Moll ubicados horizontalmente. Con el primero se obtiene  $G$ , el segundo está provisto de una banda parasol del tipo Schuepp:D, el tercero dirigido hacia abajo y siempre ubicado a un metro por encima del cultivo: $E$ . La energía total transmitida al suelo es obtenida por varios piranómetros lineales (2) montados en serie; la parte enviada por el suelo hacia el follaje es estimada a partir de la medida del albedo del suelo.

Siendo la fotosíntesis proporcional al número de fotones recibidos, todas las energías son expresadas también en einsteins por  $\text{m}^2$  por segundo (1 einstein =  $6,023 \cdot 10^{23}$  quantum). Las medidas de  $G$  y  $D$  permiten evaluar la energía útil para la fotosíntesis incidente sobre la vegetación (7). Pero las energías reflejadas o transmitidas al suelo no son tan ricas en energía útil para la fotosíntesis, y se efectuaron sus medidas con células Lambda. Todas las energías útiles para la fotosíntesis son indicadas por el índice:  $\psi$ .

No se ha medido el contenido energético de la caña y se supone el valor promedio (3,4):

$$\begin{aligned} 1 \text{ g de materia seca} &= 16700 \text{ joules} \\ &= 0,076 \text{ einsteins} \end{aligned}$$

### Resultados

#### Evolución de la materia seca

La Figura 1 muestra la evolución de la materia seca producida por las partes aéreas en un metro cuadrado de suelo, en función del tiempo y del índice foliar durante la fase vegetativa.

La producción obtenida al momento de la cosecha es la misma tanto para la caña planta como para la del primer retoño; pero en el primer caso ella es obtenida en 11 meses (radiación global incidente:  $6000 \cdot 10^6$  joules  $\text{m}^2$ ) y en el segundo en 8 meses ( $4800 \cdot 10^6$  joules  $\text{m}^2$ ). Esta diferencia se observa durante todo el tiempo de vegetación y puede parecer que el desarrollo del sistema radical de la plantación original necesita dos o tres meses. Sin embargo, para el retoño los valores máximos del índice foliar son más altos (8 en vez de

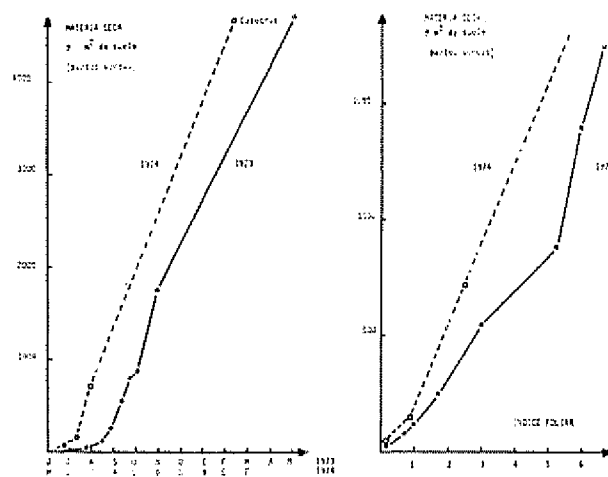


Fig. 1 — Evolución de la materia seca producida por las partes aéreas en función del tiempo o del índice foliar.

6,5) así como la producción de materia seca de un mismo índice foliar.

Si se consideran en conjunto los dos ciclos (del 8 de junio de 1973 al 15 de enero de 1975) se obtienen 9400 g de materia seca por  $\text{m}^2$  en las partes aéreas y 11275 g  $\text{m}^2$  de materia seca total.

#### Evolución de la energía interceptada

La energía interceptada por el follaje es igual a: energía total incidente ( $G$ ) — energía reflejada por el conjunto suelo cultivo ( $aG$ ) — energía transmitida al suelo ( $tG$ ) + energía transmitida y reflejada por el suelo ( $a_0 \cdot tG$ );  $a_0$  y  $a$  son los coeficientes de reflexión del suelo y del conjunto suelo-cultivo,  $t$  es el coeficiente de transmisión de la cubierta vegetal.

La proporción de energía interceptada es entonces:

$$\begin{aligned} C &= \{ G - aG - tG + a_0(tG) \} / G \\ &= 1 - a - t + a_0t \end{aligned}$$

De la misma manera la proporción de fotones útiles interceptados es:

$$\begin{aligned} C\psi &= \{ G\psi - a\psi G\psi - t\psi G\psi + a_0\psi(t\psi G\psi) \} / G \\ &= 1 - a\psi - t\psi + a_0\psi t\psi \end{aligned}$$

La eficiencia de intercepción es entonces:

$$\epsilon_i = C\psi \cdot G\psi / G$$

La fotosíntesis utiliza solamente los fotones de la radiación visible; la eficiencia de intercepción de la luz no puede ser superior a la proporción: energía útil/energía total ( $G\psi / G \approx 0,5$ ).

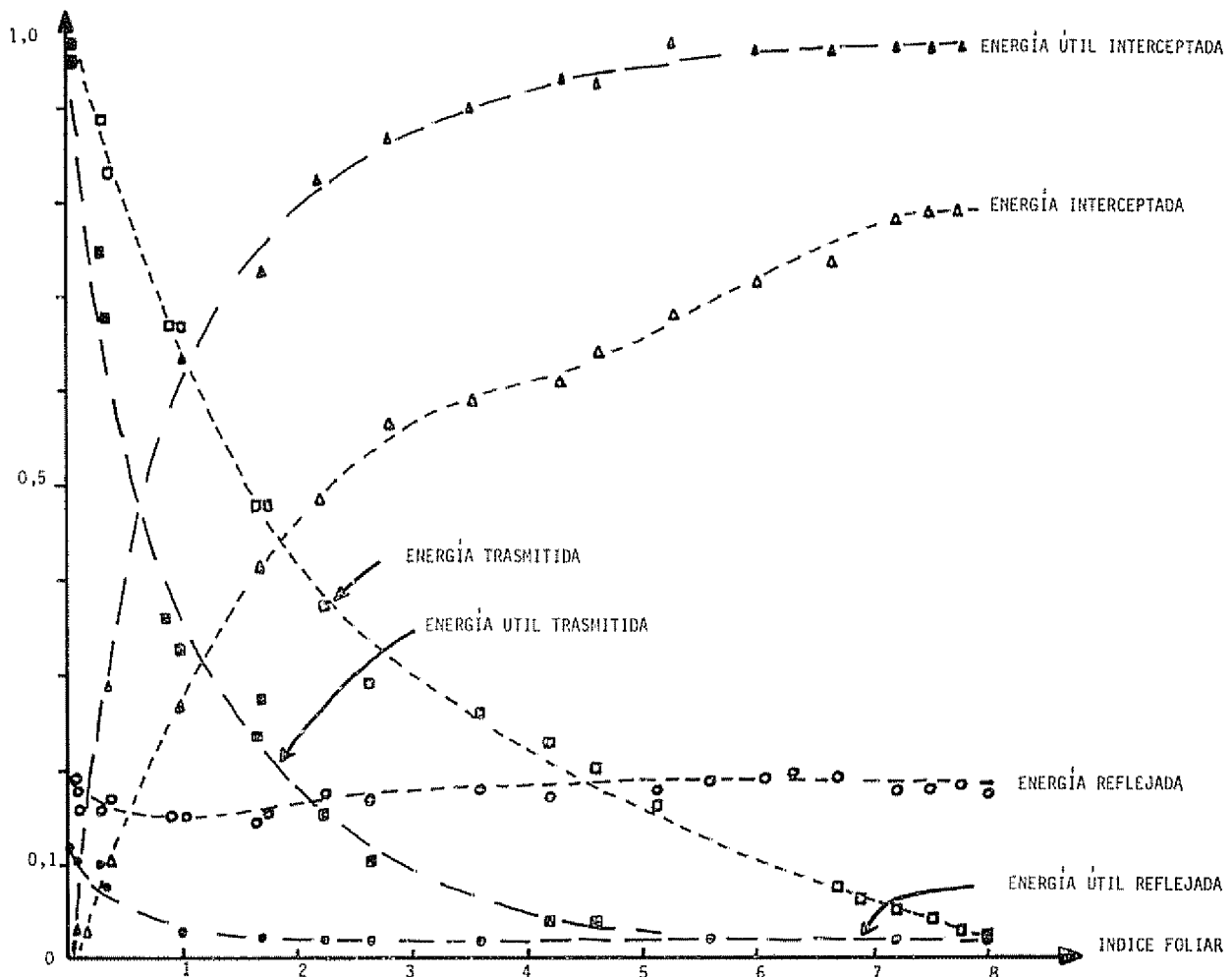


Fig 2 —Evolución de las energías totales y útiles, reflejadas, transmitidas e interceptadas, en función del índice foliar. 1974.

Las variaciones de  $a, t, C, a\psi, t\psi, C\psi$  en función del índice foliar, son representadas en la Figura 2 para el retoño; las variaciones son idénticas en el primer ciclo vegetativo. Los coeficientes varían mucho cuando los valores del índice foliar ( $f$ ) son bajos. Cuando el índice foliar es superior a 5, las partes de la energía útil reflejada o transmitida son constantes: el coeficiente de captación  $C\psi$  alcanza el valor máximo

*Evolución del rendimiento energético global  $e$ , del rendimiento con relación a la energía absorbida  $e_p$ , y de la eficiencia de interceptación  $e_i$*

Las variaciones de  $e_p, e_i$  y  $e$  para intervalos de tiempos variables son dadas en la Figura 3.

Para los dos ciclos vegetativos estudiados la interceptación de la energía aumenta fuertemente con el desarrollo del cultivo hasta un índice foliar próximo a 5, después se mantiene constante. Se pueden distinguir dos fases: en la primera los valores de  $e_i$  aumentan (de 0 a 0,48), en la segunda los valores de  $e_i$  son elevados y constantes (0,48).

Para la caña planta el rendimiento con relación a la energía útil absorbida ( $e_p$ ) crece con el desarrollo del follaje hasta un valor máximo, y disminuye posteriormente. Después de la cosecha, el valor de  $e_p$  para el retoño es primeramente muy fuerte (quizás debido a la influencia de las reservas de la cepa) después disminuye rápidamente en función del tiempo de la misma forma que en la caña planta, pero a un nivel mucho más elevado. Las diferencias observadas se encuentran en la producción de materia seca (Figura 1)

El rendimiento energético global del cultivo es siempre muy bajo; su valor está en función de  $e_i$  y  $e_p$ ; aumenta en el curso de la primera fase, después, siendo constante  $e_i$ , varía con  $e_p$ .

Para juzgar cada cultivo en su conjunto, hemos calculado sus diferentes rendimientos para cada ciclo entero:

		$e$	$e_i$	$e_p$
Caña planta	(328 días)	0,0130	0,380	0,0340
Retoño	(253 días)	0,0163	0,394	0,0415

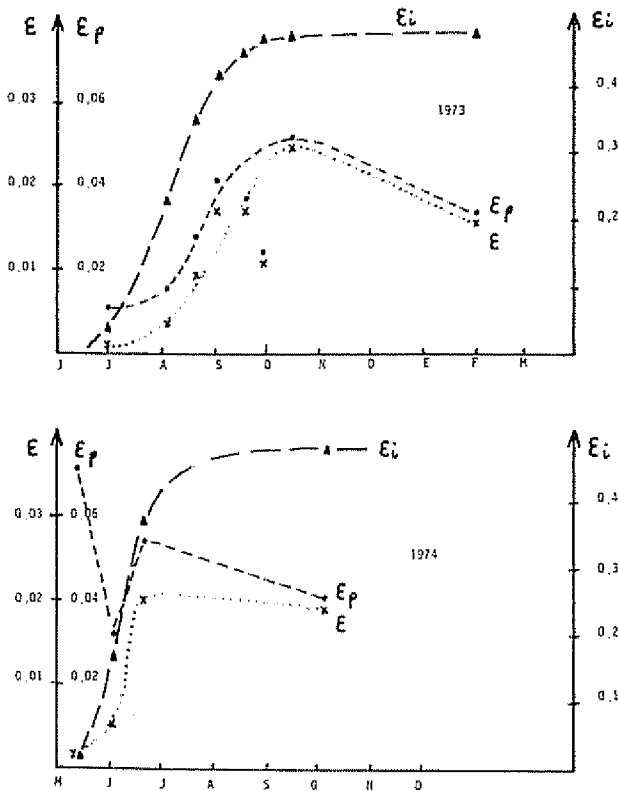


Fig. 3.—Evaluación del rendimiento energético global  $E$  y de sus componentes  $E_i$  y  $E_p$  durante los dos ciclos vegetativos.

y para juzgar la variedad hemos considerado globalmente los dos años de cultivo (581 días), teniendo en cuenta la producción de las partes aéreas y la producción total (cepa + raíces):

	$\epsilon$	$\epsilon_i$	$\epsilon_p$
Partes aéreas	0,0145	0,386	0,0376
Producción total (partes aéreas + partes subterráneas)	0,0172	0,386	0,0447

Se puede mencionar que los valores de los rendimientos indicados en la Figura 3 (para breves intervalos de tiempo) son diferentes a los valores calculados sobre el ciclo vegetativo entero; por ejemplo,  $\epsilon_i$  tiene valores instantáneos cercanos a 0,48, mientras que para los dos años de cultivo la energía útil absorbida/energía incidente es solo de 0,386 (valor promedio).

**Conclusiones**

La eficiencia global  $\epsilon$  aparece siempre baja cualquiera que sea el período considerado. Esto se explica por los valores bajos del rendimiento con relación a la energía absorbida ( $\epsilon_p$ ). Sin embargo en el curso de la fase de implantación del cultivo, la intercepción de la energía es el factor limitante. Para aumentar el rendimiento

energético se pueden seleccionar variedades de alto poder fotosintético, pero además, debe tenerse en cuenta la rapidez del desarrollo foliar.

Los resultados obtenidos demuestran que los rendimientos energéticos varían considerablemente durante el desarrollo del cultivo ( $\epsilon = 0,0035$  para  $f = 0,7$ ;  $\epsilon = 0,025$  para  $f = 7,5$ ). Los rendimientos son diferentes según se considere la energía global, la energía útil incidente y la energía útil captada; por ejemplo cuando  $f = 0,7$ , los rendimientos son 0,0035 — 0,0070 — 0,016 respectivamente. Para comparar los diferentes resultados, es necesario tener cuidado con los intervalos de tiempo y las unidades de energías.

Puede parecer asombroso que un cultivo de caña de azúcar, considerado como altamente productivo, haya transformado solamente 1,73 por ciento de la energía solar incidente en energía química potencial contenida en su materia seca, pues solo 1,45 por ciento es utilizable (partes aéreas). En realidad si se le compara con otros tipos de cultivos, estos valores son altos, por ejemplo en un cultivo de *Vigna unguiculata* obtuvimos:  $\epsilon = 0,0078$ ,  $\epsilon_i = 0,232$  y  $\epsilon_p = 0,0336$  para un ciclo vegetativo de 50 días (8).

A pesar de todo, las plantas, consideradas como sistema de transformación de la energía solar son actualmente máquinas de un rendimiento mediocre.

**Resumen**

La evolución del rendimiento energético (energía almacenada en forma de materia seca / energía incidente) de un cultivo de caña de azúcar fue estudiada sobre dos ciclos vegetativos, considerando separadamente el rendimiento del cultivo con relación a la energía absorbida (energía de la materia seca producida / energía útil absorbida) y la eficacia de intercepción de la radiación solar por la vegetación (energía útil absorbida / energía incidente).

El rendimiento energético global de la caña de azúcar (en 580 días) es bajo: 0,0145 (1,45 por ciento), resultando un bajo rendimiento con relación a la energía absorbida (0,038) a pesar de una gran eficacia de intercepción (0,386).

**Resume**

L'évolution du rendement énergétique (énergie stockée sous forme de matière sèche / énergie solaire incidente) d'une culture de canne à sucre a été étudiée sur deux cycles végétatifs, en considérant séparément le rendement de la culture par rapport à l'énergie absorbée (énergie de la matière sèche produite / énergie solaire utile absorbée) et l'efficacité de l'interception des rayonnements solaires par la végétation (énergie utile absorbée / énergie incidente).

Le rendement énergétique global de la canne à sucre (en 580 jours) est bas: 0,0145 (1,45 pour cent), cela résulte d'un rendement photosynthétique par rapport à l'énergie absorbée faible (0,038) malgré une bonne efficacité d'interception (0,386).

*Literatura citada*

- 1 BALDY, C y JONARD, P Contribution à l'étude du rendement photosynthétique du blé Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, Série D268:1296-1299 1969
- 2 COMBRES, J C., BONHOMME, R., BALDY, C, GOILLOT, C, PARCEVAUX, S. Un pyranomètre linéaire destiné à mesurer le rayonnement sous couvert végétal *In* Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère Paris, INRA, 1970 pp 59-70
- 3 KUBIN, S Measurement of radiant energy. *In* Plant Photosynthetic Production, Manual of methods. The Hague, Junk, 1971 pp 702-763
- 4 KVEI, J y MARSHALL, J K Assessment of leaf area and other assimilating plant surface *In* Plant Photosynthetic Production, Manual of methods The Hague, Junk, 1971, pp 517-546
- 5 LOOMIS, R. S y WILLIAM, W. A. Maximum crop productivity: an estimate Crop Science 3:67-72. 1962.
- 6 NICHIPOROVICH, A A Evaluation of productivity by studying photosynthesis as a function of illumination *In* Fonctionnement des écosystèmes terrestres au niveau de la production primaire Copenhague, UNESCO, 1968 pp 261-270.
- 7 VARLET GRANCHER, C. Variation et estimation de l'énergie d'origine solaire reçue sur les plans d'inclinaison et d'azimut variables Annales Agronomiques 26(3): 245-264 1975.
- 8 ——— y BONHOMME, R Utilization de l'énergie solaire par une culture de *Ficus sinensis* III Evolution du rendement énergétique pendant la phase végétative Annales Agronomiques 25(6):811-819 1974
- 9 WASSINK, E C Light energy conversion in photosynthesis and growth of plants. *In* Actes du Colloque de Copenhague, UNESCO, 1968 pp 53-66.