

M. M. GONZÁLEZ-REAL y A. BAILLE

Área de Ingeniería Agroforestal

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica
Universidad Politécnica de Cartagena

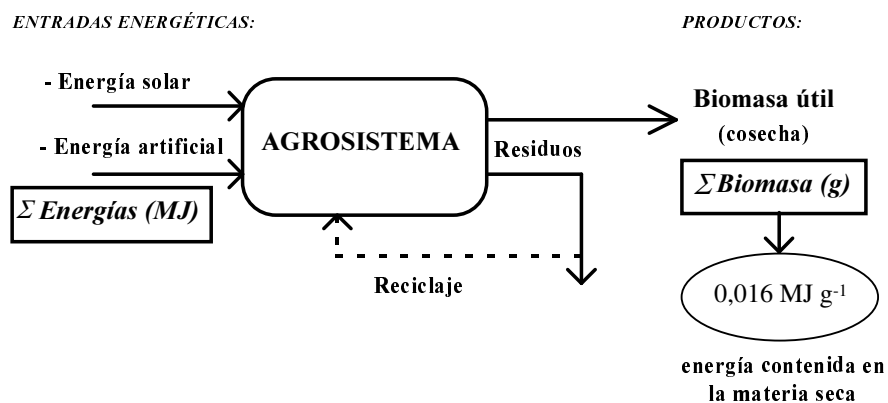
Correo electrónico:

mayla.gonreal@upct.es

alain.baille@upct.es

PARTE I

INVERNADERO, ENERGÍA Y PRODUCTIVIDAD



Contenido de la Parte I

- 1- Conceptos de eficiencia de un agrosistema
2. *Productividad potencial y eficiencias asociadas*
3. *Ejemplo de evaluación de la productividad potencial*

Referencias



PARTE I INVERNADERO, ENERGÍA Y PRODUCTIVIDAD

La agricultura moderna, y sobre todo la producción bajo invernadero, exigen además del aporte de energía solar, de agua y de mano de obra, cantidades importantes de energía "artificial" (combustibles, fertilizantes,

pesticidas). El estudio del ciclo de la energía de un agrosistema es útil para determinar y evaluar la eficiencia de conversión de cada una de las fuentes de energía utilizadas en la producción de biomasa útil. Esta Unidad presenta los conceptos de eficiencia energética y de conversión de la radiación, y su aplicación al agrosistema invernadero.

1- CONCEPTOS DE EFICIENCIA DE UN AGROSISTEMA

1.1- EFICIENCIA ENERGÉTICA

La eficiencia energética global (η) de un agrosistema se puede definir:

- Como el cociente entre la biomasa útil y la energía o energías que exige la elaboración de la biomasa:

$$\eta \text{ (g MJ}^{-1}\text{)} = \frac{\Sigma \text{ Biomasa útil}}{\Sigma \text{ Energía(s)}}$$

- Como el cociente entre la energía contenida en biomasa seca útil ($0,016 \text{ MJ g}^{-1}$) y la energía o energías que exige la elaboración de la biomasa:

$$\eta \text{ (MJ MJ}^{-1}\text{)} = \frac{\Sigma \text{ energía contenida en biomasa seca útil}}{\Sigma \text{ Energía(s)}}$$

La eficiencia energética global del sistema se puede referir respecto a la energía natural (incidente o interceptada por el cultivo) o a la energía "artificial", o a la suma de las dos.

Generalmente, las "entradas" energéticas del sistema se separan en "directas" e "indirectas": (Figura 1).

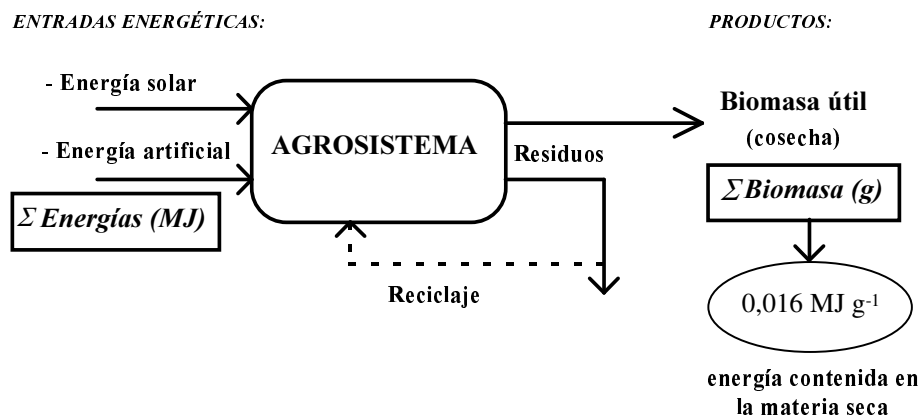


Figura 1. Representación esquemática del concepto de eficiencia energética

1.2- EFICIENCIA DE CONVERSIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR EN MATERIA SECA

En los modelos energéticos, la producción potencial de biomasa es una función de la radiación solar incidente. El conjunto de procesos físicos y biológicos que abarcan desde la incidencia de la radiación sobre la vegetación hasta la producción de biomasa se integran en una eficiencia global de conversión (ϵ) de la radiación solar en materia seca. La relación propuesta es:

$$\epsilon = \text{MS/G} \quad \text{o bien} \quad \epsilon = \text{MS/PAR}$$

siendo, respectivamente, MS, G y PAR los valores acumulados sobre un periodo de tiempo, Δt (Δt = día, mes, año, ciclo de cultivo, etc.) de:

- La biomasa seca (en g m^{-2})
- La radiación global solar (MJ m^{-2})
- La radiación fotosintéticamente activa (MJ m^{-2})

En este tipo de modelos de predicción de productividad de biomasa, es necesario conocer esta eficiencia de conversión de la radiación, que se expresa en g MJ^{-1} .

2- PRODUCTIVIDAD POTENCIAL Y EFICIENCIAS ASOCIADAS

2.1- DEFINICIONES

La eficiencia global de conversión se puede disociar en *un producto de eficiencias específicas de los procesos físicos y biológicos implicados en la conversión*: Se consideran generalmente tres componentes:

- **La eficiencia de radiación fotosintética o eficiencia climática (ϵ_{PAR})**. Corresponde a la fracción de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) respecto a la radiación global solar:

$$\epsilon_{\text{PAR}} = \text{PAR}_0 / G_0$$

siendo, respectivamente, G_0 y PAR_0 la radiación global solar y la radiación PAR que inciden en la cima de la vegetación. La eficiencia ϵ_{PAR} alcanza un valor prácticamente constante en las condiciones naturales ($\epsilon_{\text{PAR}} \approx 0.50$).

- **La eficiencia de interceptación por la vegetación (ϵ_i)**, que expresa la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el dosel vegetal. Esta eficiencia que varía con el índice de superficie foliar y con la estructura de la vegetación:

$$\epsilon_i = \text{PAR}_i / \text{PAR}_0$$

siendo PAR_i la radiación PAR interceptada por el cultivo.

- **La eficiencia de conversión de la radiación en materia seca (ϵ_c)** que depende del tipo de planta y de su estado fisiológico. El valor de ϵ_c se calcula como el cociente entre la biomasa seca y la radiación PAR interceptada por el cultivo:

$$\epsilon_c = \text{MS} / \text{PAR}_i$$

En general, ϵ_c es ligeramente inferior a unos 2 $\text{g}_{\text{MS}} \text{MJ}^{-1}$ para las especies C_3 . Bajo invernadero se pueden obtener valores superiores, debido a que los cultivos se encuentran en mejores condiciones ambientales (sobre todo en invernaderos con control del clima).

A partir de la definición de estas tres eficiencias, la eficiencia global ϵ se escribe a partir de la relación siguiente:

$$\epsilon = \epsilon_{\text{PAR}} \epsilon_i \epsilon_c = \left(\frac{\text{PAR}_o}{G_o} \right) \left(\frac{\text{PAR}_i}{\text{PAR}_o} \right) \left(\frac{\text{MS}}{\text{PAR}_i} \right) = \frac{\text{MS}}{G}$$

$$\begin{matrix} \downarrow & & \downarrow \\ \left(\frac{\text{g}}{\text{MJ}} \right) & & \left(\frac{\text{g}}{\text{MJ}} \right) \end{matrix}$$

Se puede entonces expresar la producción potencial de materia seca de un cultivo como sigue:

$$\text{MS} = \epsilon_{\text{PAR}} \sum_{t_0}^{t_1} \epsilon_i \epsilon_c G_o$$

con MS en $\text{g}_{\text{MS}} \text{m}^{-2} \Delta t^{-1}$, G_o en $\text{MJ m}^{-2} \Delta t^{-1}$ y ϵ_c en $\text{g}_{\text{MS}} \text{MJ}^{-1}$

Si ϵ_i y ϵ_c permanecen constantes a lo largo del ciclo vegetativo:

$$\text{MS} = \epsilon_{\text{PAR}} \epsilon_i \epsilon_c \sum_{t_0}^{t_1} G_o$$

De esta relación se deduce que la biomasa potencial producida por un cultivo es proporcional al valor acumulado de la radiación global solar (Figura 2).

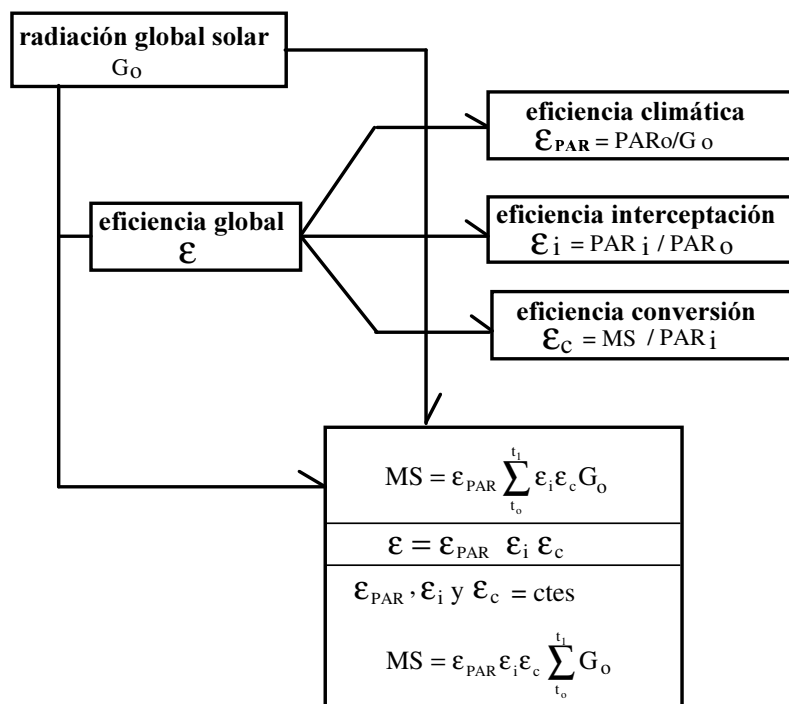


Figura 2. Representación esquemática de la conversión de la energía (radiación solar) en materia seca. La eficiencia global de conversión (ϵ) de la radiación global solar (G) en materia seca (MS) se disocia en un producto de eficiencias específicas de los procesos físicos y biológicos implicados en la conversión [eficiencia climática (ϵ_{PAR}), eficiencia de interceptación ϵ_i] y eficiencia de conversión (ϵ_c).

2.2- EFICIENCIA DE INTERCEPTACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

a) Caso general

La atenuación que experimenta la radiación solar al atravesar una cubierta vegetal de superficie foliar acumulada ISF ($m^2_{hojas} m^{-2}_{suelo}$) se puede evaluar por medio de la ley de Beer:

$$G_z = G_0 e^{(-k ISF_z)}$$

donde:

SF_z es el índice de superficie foliar acumulado a la profundidad z , en $m^2_{hoja} m^{-2}_{suelo}$. En la cima de la vegetación $ISF_z = 0$; en la base de la vegetación, $ISF_z = ISF$.

G_z es la radiación solar global que es transmitida a la profundidad z , bajo un índice de superficie foliar acumulado ISF_z .

k es el coeficiente de extinción de la radiación solar global.

El esquema de la Figura 3 representa la atenuación de la radiación solar al atravesar una cubierta vegetal uniforme, siendo G_r y G_{tr} la radiación solar reflejada por la vegetación y por el suelo, respectivamente.

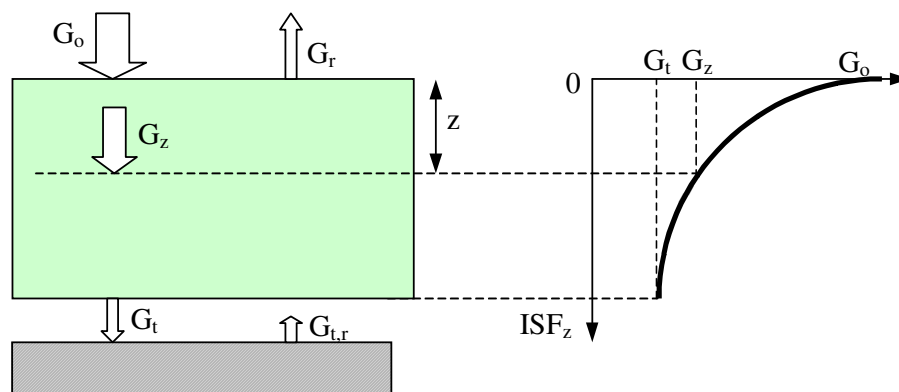


Figura 3. Esquema de la atenuación de la radiación solar a través una cubierta vegetal uniforme. G_o = radiación que incide en la cima de la vegetación, G_z radiación transmitida a una profundidad z , G_t = radiación transmitida a nivel del suelo, G_r y G_{tr} son, respectivamente, la radiación solar reflejada por la vegetación y por el suelo.

Si consideramos que la radiación reflejada por la vegetación y por el suelo (G_r y G_{tr}) son despreciables:

- El valor de la radiación solar interceptada por una superficie de índice de superficie foliar ISF_z situada a una profundidad z será igual a:

$$G_{i,z} = G_o - G_z = G_o \left[1 - e^{(-k ISF_z)} \right]$$

-El valor de la radiación solar total interceptada por la cubierta vegetal con índice de superficie foliar ISF será igual a:

$$G_i = G_o - G_t = G_o \left[1 - e^{(-k ISF)} \right]$$

La eficiencia de interceptación respecto a la radiación global solar se calcula como:

$$\epsilon_i = \frac{G_i}{G_o} = \left[1 - e^{(-k ISF)} \right]$$

Esta ley se puede aplicar también para la radiación PAR:

$$PAR_i = PAR_o - PAR_t = PAR_o \left[1 - e^{(-k ISF)} \right]$$

$$\epsilon_i = \frac{PAR_i}{PAR_o} = \left[1 - e^{(-k ISF)} \right]$$

La figura 4 muestra la evolución de la eficiencia de interceptación de la radiación en función del índice de superficie foliar.

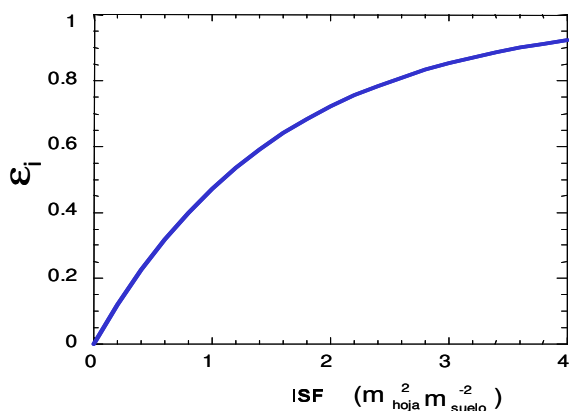


Figura 4. Evolución de la eficiencia de interceptación de la radiación solar con respecto al índice de superficie foliar, ISF

b) Bajo invernadero

Para calcular la productividad potencial de cultivos en invernadero, además de tener en cuenta las eficiencias mencionadas previamente, hay que considerar el **coeficiente de transmisión** de la radiación solar, τ . Este coeficiente depende, entre otros factores, de la ubicación del invernadero, de su orientación (N-S, E-O), del tipo de material de cubierta y de la estructura del invernadero (efecto de sombreo).

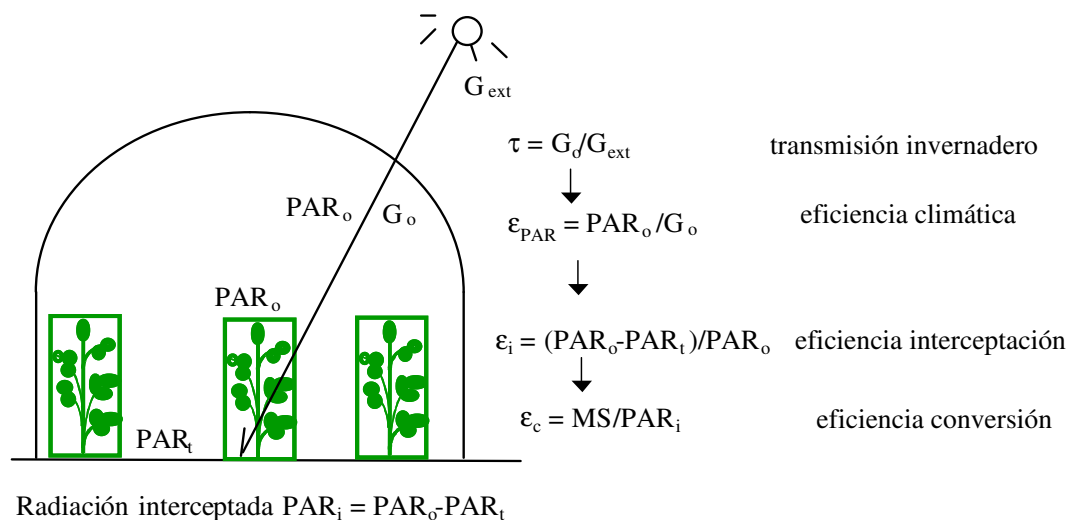


Figura 4. Los diferentes componentes de la eficiencia de conversión bajo invernadero

Si aplicamos la ley de Beer, la radiación PAR que llega a nivel del suelo (es decir, la radiación transmitida por el dosel vegetal) PAR_t , será:

$$PAR_t = PAR_o e^{-k ISF}$$

siendo:

k = coeficiente de extinción (m^2_{suelo}/m^2_{hoja}), ISF = índice de superficie foliar m^2_{hoja}/m^2_{suelo}

Radiación interceptada $PAR_i = PAR_o - PAR_t$

La eficiencia de interceptación será: $\epsilon_i = \frac{PAR_o - PAR_t}{PAR_o} = 1 - e^{-k ISF}$

La materia seca acumulada durante un determinado periodo de tiempo entre t_1 y t_2 :

$$MS = \tau \epsilon_{PAR} \epsilon_i \epsilon_c \sum_{t_0}^{t_1} G$$

c) Valores de la eficiencia de conversión bajo invernadero

Cuando se analiza la relación entre la MS producida y la radiación PAR interceptada sobre un período de cultivo, se observa que la mayoría de las especies C_3 cultivadas bajo invernadero acumulan, en valor medio sobre dicho periodo, cerca de 3 g de materia seca por MJ de radiación PAR interceptada, pudiendo alcanzar los 4 $g_{MS} MJ^{-1}$ (Baille, 1999). Estos valores son superiores a los valores observados en especies C_3 cultivadas en el exterior (del orden de 2 $g_{MS} MJ^{-1}$, Monteith, 1966). Estas diferencias pueden explicarse debido a condiciones climáticas generalmente más favorables bajo invernadero que al exterior. Además, bajo invernaderos de plástico la proporción de radiación difusa es superior a la que se observa en el exterior, siendo la radiación difusa interceptada por el cultivo con mayor eficiencia debido a que no ejerce efecto de sombreo.

Para estimar la productividad sobre un ciclo de cultivo, se supone que la eficiencia de conversión es constante a lo largo del ciclo. Sin embargo, existen variaciones importantes de la eficiencia de conversión a lo largo del ciclo. La Figura 5 muestra que, en el caso del pepino cultivado en invernadero, el valor más elevado de ϵ_c se obtiene cuando la carga en frutos de la planta es elevada. La razón es que la planta ajusta su capacidad fotosintética en función del equilibrio entre fuentes (hojas) y sumideros (frutos) de asimilados.

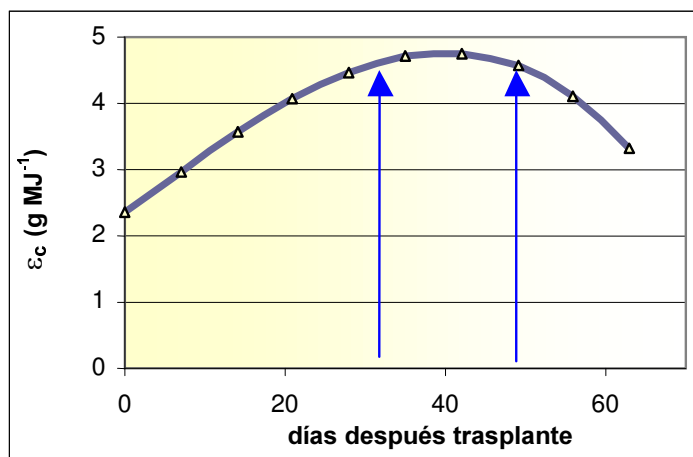


Figura 5. Evolución de la eficiencia de conversión de la radiación PAR en materia seca en un cultivo de pepino bajo invernadero. Las flechas indican el periodo en el que la carga de frutos en la planta es máxima

3- EJEMPLO DE EVALUACIÓN DE PRODUCTIVIDAD POTENCIAL

Producción potencial en Murcia y en Holanda bajo invernadero (Figura 6).

Como punto de partida podemos considerar que, en un cultivo de tomate bajo invernadero dotado con un sistema de climatización eficiente, se puede mantener durante todo el año una eficiencia media de conversión de la radiación interceptada del orden de $3 \text{ g}_{\text{MS}} \text{ MJ}^{-1}$. Suponiendo que la eficiencia de interceptación es de 0,80, y la transmisión del invernadero es de 0,70, los rendimientos en MS serían respectivamente:

- de $5,4 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en Murcia (Radiación global exterior de $6400 \text{ MJ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$)
- de $3,0 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en Holanda (Radiación global exterior de $3600 \text{ MJ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$)

Es decir, una producción potencial que sería un 60% superior en el Sur de España que en el Norte de Europa.

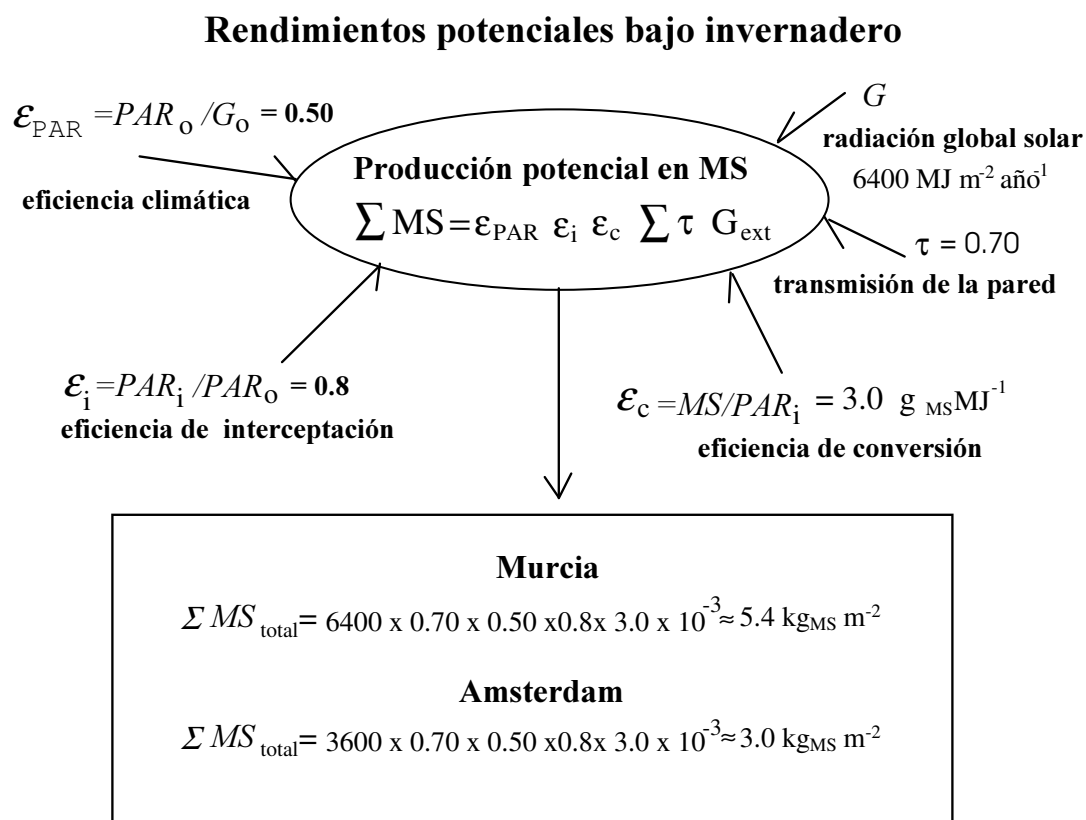


Figura 6. Producción potencial en Murcia y en Holanda bajo invernadero

Suponiendo que el índice de cosecha es de 70% (es decir, 70% de la biomasa total de la planta se destina a los frutos), y que el porcentaje de MS de los frutos es de 5%, el rendimiento potencial en materia seca sería de 75 kg m^{-2} en Murcia y de 42 kg m^{-2} en Holanda.

En la realidad, las producciones en Murcia están lejos de alcanzar la productividad potencial, puesto que con invernaderos sin cultivar en verano, debido a las condiciones extremas de temperatura, y sin calefacción en invierno, los rendimientos, en los mejores casos, rondan los 25 kg m⁻². Sin embargo, en Holanda los productores obtienen la producción potencial con rendimientos que varían entre 40 y 45 kg m⁻² (Figura 7) llegando a obtener, con enriquecimiento en CO₂, rendimientos de 55 a 60 kg m⁻².

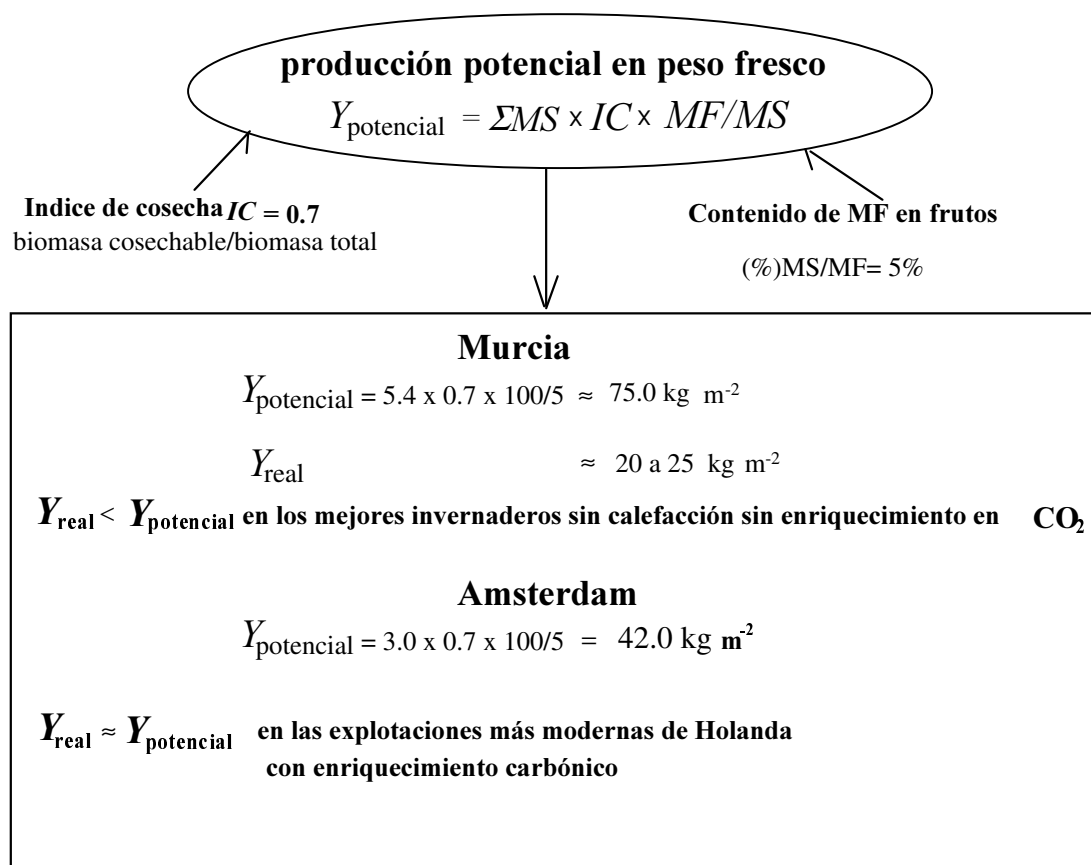
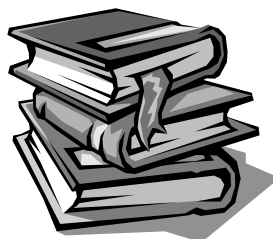


Figura 7. Productividad de cultivos de tomate bajo invernadero en Murcia y en Holanda

Este ejemplo pone de manifiesto la importancia que tienen el control del clima y los equipos de climatización en la productividad de los cultivos de invernadero. Sin embargo, los costes de climatización (sobre todo de calefacción) son muy elevados en Holanda, siendo muy bajos o inexistentes en Murcia. Por consiguiente, la eficiencia energética, en lo que se refiere a la producción de biomasa por unidad de energía artificial, es mucho más elevada en Murcia que en el Norte de Europa.



Referencias bibliográficas

Parte I. Invernadero, energía y productividad

BAILLE A., 1999. Energy Cycle. In: Z. Enoch and G. Stanhill (eds). *Ecosystems of the World. The Greenhouse Ecosystem*. Capítulo 11, 265-285.

CHALLA H., BAKKER M., 1996. Potential production within the greenhouse environment. In: Z. Enoch and G. Stanhill (eds). *Ecosystems of the World. The Greenhouse Ecosystem*. Capítulo 15, 333-347.

GOSSE G., VARLET-GRANCHER C., BONHOMME R., CHARTIER M., ALLIRAND J. M., LEMAIRE G., 1986. Production de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, 6: 47-56.

MONTEITH J. L., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9, 747-766

MONTEITH J. L., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. London, B.*, 281, 277-94.

MONTEITH J.L., 1994. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. *Agric. For. Meteorol.*, 68: 213-220.

STANHILL G., 1980. The energy cost of protected cropping: a comparison of six systems of tomato production. *J. Agric. Engin. Research*, 25: 145-154