

# Los Balances energéticos en la producción agropecuaria

Recibido para evaluación: 25 de Sep de 2004

Aceptación: 2 de Nov de 2004

Entrega de versión final: 3 de Marzo de 2005

Guillermo Yepes Jaramillo<sup>1</sup>  
Enrique Martínez Bustamante<sup>2</sup>

## RESUMEN

A través de este ensayo se presenta otro enfoque de análisis de la energía utilizada por los vegetales para la producción agraria. Se parte de los conceptos fundamentales relacionados con la termodinámica y la manera como el flujo de energía incide sobre el follaje de la vegetación y se distribuye, a través de las hojas, en todo el dosel de comunidades de plantas. La vida en la tierra es mantenida por el flujo de energía radiado por el sol y que entra a la biosfera. Por medio de la fotosíntesis, esta es fijada en las plantas en forma de calor químico latente, desde el cual, todos los eslabones de la cadena alimenticia, derivan energía necesaria para sus procesos vitales. Para las plantas, sin embargo, la radiación no solamente es una fuente de energía (efecto fotoenergético), es también un estímulo que gobierna el desarrollo (efecto fotocibernético) y ocasionalmente, un factor de estrés (efecto fotodestructivo). Por otra parte, el arreglo de las hojas durante el crecimiento y el desarrollo foliar, resulta en una estructura que ejerce un efecto fotohomeostático, en virtud a su ajuste armónico a la pendiente del gradiente de luz dentro de la copa. La atenuación de la radiación, en una población de plantas, depende de la densidad del follaje, del arreglo de las hojas dentro de la población y de la inclinación de ellas respecto a la radiación incidente. El modo de ramificación y el arreglo de las hojas determinan el campo individual de luz en el cual una planta vive. Para reducir una molécula de CO<sub>2</sub> y transformarla en azúcar, se necesitan como mínimo 8 cuantos de luz y, considerando la luz roja, el rendimiento teórico de la fotosíntesis sería de 32,8%. En consecuencia, el contenido de energía de la materia vegetal depende de la concentración de carbono que contenga y en la medida que este sea mayor, su contenido energético será superior. La ventaja de un análisis energético, en relación con uno económico que tome como unidad de medida un sistema monetario, es la invariabilidad de los datos energéticos en el tiempo frente a las fluctuaciones del valor de la moneda, incluso en períodos relativamente cortos. Debido a la variación en el contenido de agua, la mejor manera de comparar los cultivos es con base en el contenido calórico de las cosechas. El debate entre la productividad de los modelos de agricultura preindustrial e industrial, aun no ha terminado. Aunque la agricultura industrial y semi-industrial, incorporan grandes cantidades de insumos (incluyendo los carburantes fósiles) y de energía para la producción de alimentos, la relación entre la energía invertida y la energía contenida en los alimentos (Índice Energético) es muy baja. Aunque no existen patrones que señalen a un solo sistema de alimentos a nivel mundial como el más eficiente y racional, los esfuerzos se dirigen a aumentar la productividad del trabajo, en los sitios donde el valor del suelo es bajo, mediante el mejoramiento de las técnicas y la mecanización agrícola. Por el contrario, en lugares donde la mano de obra es barata, se han hecho esfuerzos por aumentar los rendimientos de las cosechas, gracias a la incorporación de insumos como abonos y fertilizantes.

**PALABRAS CLAVES:** Radiación, cobertura vegetal, fotoquímica, fotosíntesis, fitomasa, productores primarios

<sup>1</sup> Profesor Asociado.  
Universidad Nacional  
de Colombia, Facultad  
de Ciencias. Escuela de  
Biociencias.  
jgyepes@unalmed.edu.co

<sup>2</sup> Profesor Asociado.  
Universidad Nacional  
de Colombia, Facultad  
de Ciencias  
Agropecuarias.  
Departamento de  
Ciencias Agronómicas.  
enmartin@unalmed.edu.co

## ABSTRACT

Another focus of the energy analysis used by the vegetables for the agrarian production is presented through this essay. Starting from fundamental concepts related with the thermodynamic one and the way like the energy flow impacts on the foliage of the vegetation and its distribution through the leaves, in the whole canopy of communities of plants. Life in the earth is sustained by the energy flow radiated by the sun which enters to biosphere. By means of the photosynthesis, it is fixed in the plants in form of latent chemical heat, from which, all the links of the food chain, derive necessary energy for their vital processes. For plants, however, the radiation is not only an energy source (photoenergetic effect) it is also a stimulus that governs the development (photocybernetics effect) and occasionally a stress factor (photodestructive effect). On the other hand, the arrangement of leaves during growth and foliate evolution, become a structure that exercises a photohomoeostatic effect in virtue to its harmonic adjustment to the slope of the gradient of light inside the crown. The attenuation of the radiation in a population of plants depends on the density of the foliage, the arrangement of the leaves inside population and the inclination of them regarding the incident radiation. The ramification way and the arrangement of leaves determine the individual field of light in which a plant lives. To reduce a molecule of CO<sub>2</sub> and to transform it in sugar, it is needed as minimum eight quantum of light and, considering the red light the theoretical yield of the photosynthesis would be of 32,8%. In consequence, the content of energy of the vegetable matter depends on the concentration of carbon that contains and in the measure that it is bigger, its energy content will be superior. The advantage of an energy analysis, in connection with one economic that takes as measure unit a monetary system, is the invariability of the energy data in the time in front of the fluctuations of the value of the currency even in relatively short periods. The best way to compare cultivations is thanks the caloric content of crops due to variation in the content of water. The debate among the productivity of pre-industrial and industrial agriculture models has not still finished. Even if the industrial and semi-industrial agriculture incorporate big quantities of inputs (including fossil fuels) and energy to production of foods, the relation among the invested energy and the energy contained in the foods (Energy Index) is very low. Although patterns don't exist that point out to a single system of foods, at world level, as the most efficient and rational, the efforts go to increase the productivity of the work in places where the soil value is low by means of the improvement of techniques and agricultural mechanization. On the contrary, in places where the manpower is cheap, efforts have been made to increase the yields of crops, thanks to incorporation of inputs like manures and fertilizers.

**Key words:** Radiation, vegetative covering, photochemistry, photosynthesis, phitomass, primary producers.

## INTRODUCCIÓN

El sol es la fuente de energía que da fuerza, no solo a todas las formas de vida sino que alimenta también todas las fuentes de energía inanimadas empleadas por el hombre. (Asimov, 1985).

Una de las fuentes de provisión de energía es la agricultura. Considerada como la forma más antigua y eficiente de satisfacer las necesidades alimenticias por parte del hombre. En la práctica de la agricultura, la producción de alimentos y de productos que representan valor de uso y de transformación, se inicia a partir del aprovechamiento de la energía solar por las plantas. (Fernández, 1980).

El crecimiento y desarrollo de las plantas y la producción de cultivos, requieren de una fuente externa y gratuita de energía que proviene del sol desde hace unos siete mil millones de años y estará disponible otro periodo igual. Otra fuente de energía se compone de fuentes locales transformadas, tales como las obtenidas a partir de hidrocarburos, de la energía eléctrica y de la energía producida por el trabajo muscular animal.

La seguridad alimentaria aún no se ha resuelto como problema en los países pobres, a pesar de los avances tecnológicos y de los incrementos importantes en la productividad de los suelos y de los cultivos. Esta situación configura una crisis mundial de energía y de alimentos, estimulada además, por la falta de planificación y por la distribución inapropiada de los recursos.

Al respecto, Leach (1981), conceptúa que el fermento de las reacciones originadas por el alza de los precios del petróleo durante el período 1973/1974, ha cristalizado en numerosas y nuevas perspectivas acerca de fuentes alternativas de energía, sus aplicaciones y el futuro de dichas fuentes y el petróleo. Ahora bien, no es que las reservas de las materias primas energéticas (petróleo, carbón gas, uranio) no puedan durar probablemente, durante siglos, calculándolas al ritmo actual de consumo, sino que el grueso de todas las reservas se encuentra en manos de unos pocos países, lo cual crea el interrogante ¿estarán dispuestos a suministrarlas en las cantidades y a los precios que interesen a los consumidores?

El mismo autor afirma que existen numerosas fuentes potenciales alternativas, sin embargo, se desconoce si se pueden desarrollar a tiempo, con unos costos aceptables, y en el caso de opciones de la más alta tecnología, con unos impactos tolerables para los frágiles medios ambientales y sin consumir en exceso otros recursos, tales como el agua, los metales o la propia materia prima energética en sí misma.

Por otra parte, Odum (1986) expresa que el éxito del hombre para adaptar ciertos sistemas naturales a su propio uso, ha sido esencialmente resultado del proceso de aplicación de circuitos auxiliares de trabajo a los sistemas vegetales y animales a partir de fuentes ricas en energía como los combustibles fósiles y la fisión atómica. En la agricultura, la industria forestal, la cría de animales, el cultivo de algas y otras explotaciones, hay grandes flujos de energía auxiliar con la que se realiza gran parte del trabajo que tenía que ser “financiado” por el propio sistema.

Igualmente plantea que, cuando comienza el apoyo auxiliar, las especies que existían ya no están adaptadas puesto que sus programas internos las obligan a duplicar el trabajo realizado antes, de modo que no hay ningún ahorro. En cambio, las especies que carecen de la

información para auto-mantenerse se vuelven importantes y son seleccionadas por el hombre o por los procesos naturales de supervivencia. La domesticación, llevada a sus extremos produce “máquinas de producir materia orgánica” como las gallinas ponedoras, las vacas lecheras y los cultivos transgénicos.

Todo el trabajo de mantenimiento de estos organismos es proporcionado a través de nuevas rutas controladas y dirigidas por el hombre, que las obtiene de nuevas fuentes de energía auxiliar. En un sentido real, la energía para la producción agraria intensiva de carne y bienes vegetales proviene, en buena parte, de combustibles fósiles en vez de provenir del sol.

Los balances energéticos, como sistema de contabilidad de los ingresos y egresos en los procesos de producción de alimentos, son la base para la toma de decisiones acerca de la viabilidad de los costos ambientales de inversión de energía y de rentabilidad económica en la agricultura. Como metodología de estimativo de costos, los balances energéticos son utilizados desde la década del 70 y se han generalizado en los países desarrollados, especialmente en Europa.

## 1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES RELACIONADOS CON LA ENERGÍA: LA LEY DE LA ENTROPÍA

Odum (1986), define la **energía** como la capacidad de hacer trabajo, cuyo comportamiento es descrito por las **leyes de la termodinámica**. La **primera o ley de la conservación de la energía**, establece que “la energía puede ser transformada de un tipo a otro, pero no se crea ni destruye”. La luz (una de las formas de energía) es susceptible de ser transformada en trabajo, calor o energía potencial en forma de alimento. La **segunda ley de la termodinámica o ley de la entropía** puede plantearse de varias maneras: “ningún proceso de transformación de energía ocurre espontáneamente, a menos que haya una degradación de esta de una forma concentrada a una dispersa”; así, el calor presente en un objeto tiende a dispersarse espontáneamente hacia sus alrededores más fríos. También, esta segunda ley puede expresarse, de modo que una fracción de la energía se convierte siempre en energía calorífica no utilizable, ninguna transformación espontánea de la energía luminica a energía potencial (tal es el caso del protoplasma) tiene una eficiencia de 100%. La **entropía** (*en*, *en*, *tropé*, transformación) es una medida de la energía no disponible resultante de las transformaciones; el término también se emplea como un índice general del desorden asociado con la degradación de la energía.

El mismo autor afirma también, que todos los organismos poseen la característica termodinámica esencial, de que pueden crear y mantener un alto grado de orden interno; es decir, una baja condición de entropía (una baja magnitud de desorden o energía no disponible en un sistema). La baja entropía se logra a través de la continua y eficiente disipación de la energía de gran utilidad (como lo es la luz o el alimento) hacia energía de baja utilidad (tal es el caso del calor). Dentro del individuo, el “orden” se mantiene gracias a la respiración que “bombea” continuamente el desorden hacia afuera. En concordancia, los individuos o una comunidad son sistemas termodinámicamente abiertos, no equilibrados, que intercambian materia y energía con el medio en forma ininterrumpida para reducir su entropía interna e incrementar la externa. Cualquier sistema artificial o natural que no se ajuste a estas leyes, está destinado a desaparecer.

A las dos leyes de la termodinámica, Odum (1986) las esquematiza mediante el flujo de energía a través de una hoja, como aparece en la Figura 1. Aunque la energía no se crea ni se destruye, todas las formas de vida son acompañadas por cambios energéticos. La energía que penetra la superficie terrestre como luz visible, es equilibrada por la energía que sale de dicha superficie como radiación térmica invisible. La esencia de la vida es la manifestación de estos cambios como crecimiento, reproducción y síntesis de relaciones complejas de la materia. Sin las transferencias de energía que acompañan a estos cambios no podría existir la vida. La civilización humana es solo una de las notables proliferaciones naturales que dependen del continuo ingreso de energía concentrada; si se convirtiera en un sistema cerrado al perder su capacidad de obtener y almacenar suficiente energía de gran utilidad, pronto se desordenaría, conforme a la segunda ley: **la entropía**.

## 2. AMBIENTE ENERGÉTICO

Los organismos que habitan en la superficie de la tierra o cerca de ella reciben continuamente la luz solar y la radiación térmica de onda larga que fluye de las superficies cercanas. Ambos tipos de energía contribuyen a generar el ambiente climático (temperatura, evaporación del agua, movimiento del aire y el agua), pero solo una pequeña fracción de la radiación solar se convierte, mediante la fotosíntesis, en energía requerida por los componentes bióticos del ecosistema (Odum, 1986)

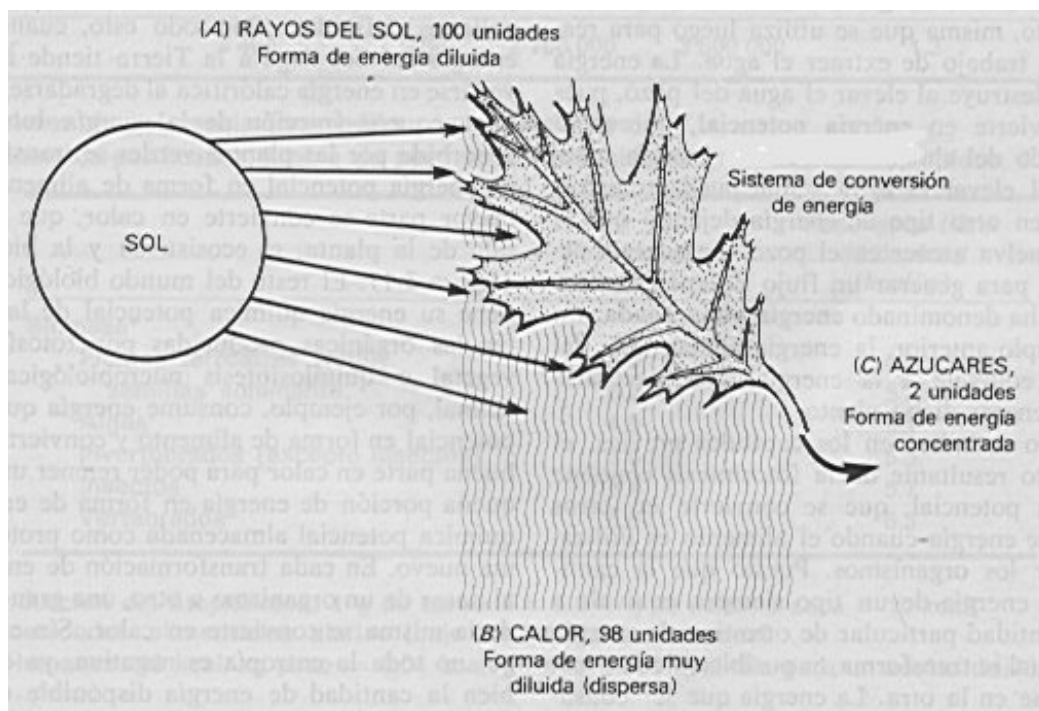
Larcher (1995), expresa que toda la vida en la tierra es mantenida por el *flujo de energía* radiado por el sol y que entra a la biosfera. Por medio de la fotosíntesis, esta energía de la radiación es fijada

en las plantas en forma de calor químico latente, desde el cual, todos los eslabones de la cadena alimenticia, derivan energía necesaria para llevar a cabo sus procesos vitales.

También manifiesta que la radiación es la fuente primaria de energía para el cambio o rotación de materiales orgánicos, y al regular el balance calórico e hídrico de la tierra, proporciona las condiciones energéticas esenciales para la vida de los organismos. Para las plantas, sin embargo, la radiación no solamente es una fuente de energía (efecto fotoenergético), es también un estímulo que gobierna el desarrollo (efecto fotocibernético) y ocasionalmente, también un factor de estrés (efecto fotodestructivo). Cada uno de estos efectos son una consecuencia de la toma de quanta de luz y cada proceso dependiente de la radiación es mediado por fotorreceptores altamente específicos cuyo espectro de absorción corresponde al respectivo evento fotobiológico (Tabla 1). Los factores importantes, aquí, son la duración, la dirección incidente y la composición espectral de la radiación recibida.

### 2.1. EL AMBIENTE DE LA RADIACIÓN

La biosfera recibe radiación solar, la cual es definida por Cuevas y Simbaqueva (2002), como la energía emitida por el sol, que se propaga en todas direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Además, las distintas características de los rayos solares están determinadas, fundamentalmente, por el valor que adquiere un parámetro físico denominado longitud de onda ( $\lambda$ ) y expresado en nm. Ese ambiente de radiación de la biosfera está compuesto por ondas de corta longitud, provenientes del sol, y de ondas largas emitidas por los propios cuerpos terrestres sólidos, líquidos o gaseosos que la rodean. Las plantas, otros organismos y cuerpos en la superficie del planeta, reciben



**Figura 1.** Las dos leyes de la termodinámica representadas mediante la conversión de la energía solar en alimento (azúcares) por fotosíntesis.  $A = B + C$  (primera ley); C es siempre menor que A, debido a la disipación de energía durante la conversión (segunda ley (Tomado de Odum, 1986)



| Región espectral                | Longitud de onda (nm)* | Energía radiante solar (%) | Efectos de la radiación |                   |                 |                |
|---------------------------------|------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------|----------------|
|                                 |                        |                            | Fotosintético           | Fotomorfogenético | Fotodestructivo | Térmico        |
| Ultravioleta                    | 290 - 380              | 0 - 4                      | Insignificante          | Ligero            | Significante    | Insignificante |
| Rango fotosintéticamente activo | 380 - 710              | 21 - 46                    | Significante            | Significante      | Ligero          | Significante   |
| Infrarrojo                      | 750-4000               | 50 - 79                    | Insignificante          | Significante      | Insignificante  | Significante   |
| Radiación onda larga            | 4.000-100.000          |                            | Insignificante          | Insignificante    | Insignificante  | Significante   |

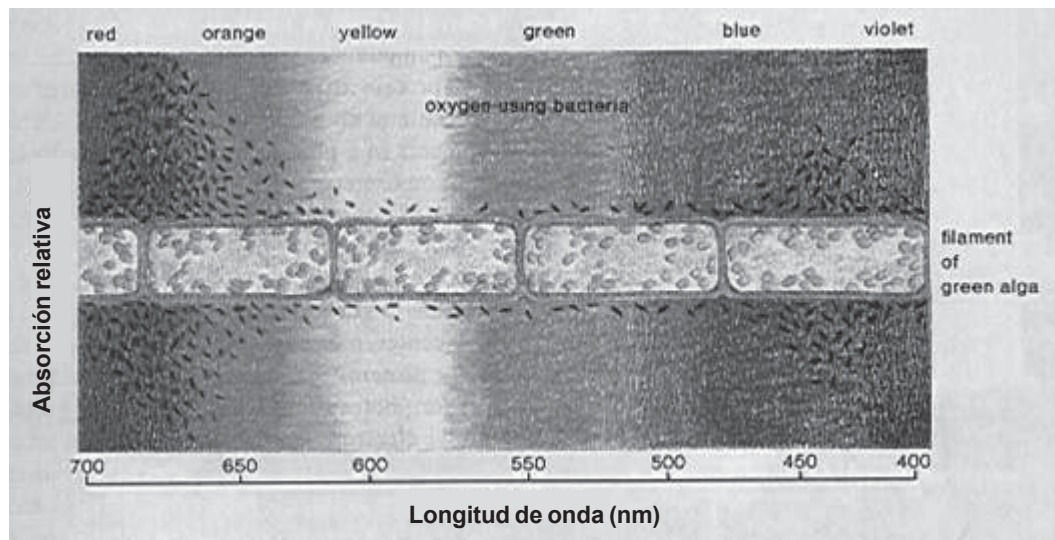
\* nm =  $1 \times 10^{-9}$  m

**Tabla 1.** Efecto de la radiación sobre la vida vegetal (Según Ross, 1981, tomado de Larcher 1995).

radiaciones que varían de 290 nm a alrededor de 3.000 nm (Larcher, 1995); aunque Silvera (1987), menciona el rango de 200 a 4.000 nm.

De acuerdo con Larcher (1995), la radiación de longitudes de onda corta es absorbida en la atmósfera superior por el ozono y el oxígeno del aire; el límite de la longitud de onda larga es determinado por el contenido de vapor de agua y dióxido de carbono de la atmósfera. Un promedio de 45% de la energía solar que llega, cae dentro del margen espectral de 380 a 710 nm, que es utilizado para la fotosíntesis de las plantas y conocida como *Radiación Fotosintéticamente Activa (RAF)*. Esta es, a menudo definida como del margen entre 400 y 700 nm, (Figura 2).

Cuevas y Simbaqueva (2001) afirman que, existe un incesante y simultáneo ingreso y egreso de radiación hacia y desde cualquiera superficie u objeto en el planeta, incluyendo las aguas. La mayor parte de la atenuación en la atmósfera se produce en la región IR; una reducción proporcionalmente menor pero de gran importancia biológica se produce en la Región UV. La dispersión y la reflexión producen una desviación en los rayos solares promoviendo una radiación **difusa**, que contrasta con la radiación **directa** que no ha sufrido tales fenómenos. Solo esta última hace que los objetos proyecten sombras. En días completamente nublados solo existe radiación difusa, en virtud de la cual existe cierta “visibilidad”. La suma de las radiaciones directa y difusa sobre una superficie horizontal se denomina **radiación global**.



**Figura 2.** Ventana de luz visible del espectro electromagnético, la cual corresponde a la *Radiación Fotosintéticamente Activa (RAF)*. Tomado de Stern (1988).

Adicionalmente, el límite inferior de este rango es la *Radiación Ultravioleta (UV)*, conocida como UV-A, comprendida en la banda espectral de 315 a 380 nm y la UV-B de 280 a 315 nm (frecuencia en cantidad abundante, aunque la mayor parte es filtrada por el aire; también se conoce la UV-C, que comprende la región del espectro solar menor de 280 nm (Castro y Simbaqueva, 2001). Larcher (1995) conceptúa que en el límite superior del espectro se encuentra la *Radiación Infrarroja (IR)*, entre 750 y 4.000 nm. Las plantas también reciben *Termorradiación* (onda larga, IR 4.000 a  $10^5$  nm) y ellas mismas emiten este tipo de radiación.

Según Milthorpe y Moorby (1974), en un cielo claro el componente difuso comprende del 10 – 15%; en días nublados todo es difuso. De la radiación que alcanza la atmósfera exterior, penetra la superficie de la tierra, en un día completamente claro, alrededor del 75% y en un día nublado cerca del 25% de la radiación que alcanza el exterior de la atmósfera

Diversos autores (Milthorpe y Moorby, 1974; Odum, 1986; Larcher, 1995 y Silveira, 1987), expresan que en el límite externo de la atmósfera terrestre la *intensidad de radiación* (densidad promedio de flujo radiante) es del orden de 1360 – 1390 W. m<sup>-2</sup> ó

2 gcal. cm<sup>-2</sup>. min<sup>-1</sup> (constante solar). De esto, solamente, un promedio del 47% alcanza la superficie de la tierra, ya que la radiación tiene que pasar a través de nubes, agua y vegetación. Más de la mitad se pierde por rechazo en el espacio como resultado de la refracción y difracción en la alta atmósfera, o dispersada o absorbida por las partículas suspendidas en el aire. A nivel del mar, la radiación global alcanza valores máximos de, aproximadamente, 1 kW m<sup>-2</sup> e intensidades en la RAF de 400 W m<sup>-2</sup> (equivalente a una Densidad de Flujo Fotónico Fotosintético, DFFF, de aproximadamente 1.800 ¼moles de fotones m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> \*). Como máximo, al mediodía, con cielo despejado llega a la superficie de la tierra 1,34 gcal cm<sup>-2</sup>. min<sup>-1</sup> (67% de la constante solar), de tal suerte que la entrada diaria de luz solar hasta la capa autótrofa del ecosistema varía entre 100 y 800 gcal cm<sup>-2</sup>. min<sup>-1</sup>, aunque el promedio se localiza entre 300 y 400 gcal cm<sup>-2</sup>. min<sup>-1</sup> (3.000 y 4.000 kcal cm<sup>-2</sup> en regiones templadas

En la Tabla 2 se presenta una aproximación cruda del destino de la energía con relación a la superficie vegetal sobre un día claro de verano con amplia disponibilidad de agua. Alrededor de 7% de la RAF y 30 – 40% de la IR es reflejada desde las hojas (25 – 24 de la radiación *total* es reflejada desde la vegetación comparada con un 10 – 20% desde el suelo desnudo y cerca del 5% desde el agua). Hay un intercambio continuo de radiación de onda larga entre la tierra y la atmósfera, con un flujo desde el cielo y un flujo neto hacia arriba desde el suelo. Con cielo claro, la radiación hacia el exterior es de 10 a 15 veces la encontrada bajo condiciones completamente nubladas. La radiación neta que es absorbida en la superficie es convertida a otras formas de energía: calor latente de evaporación (evaporación del agua), calor sensible (calentamiento de las capas inferiores de la atmósfera, la vegetación y las capas de la superficie del suelo) y energía química (fijada en productos de fotosíntesis). Estas proporciones varían apreciablemente en diferentes situaciones (Milthorpe y Moorby, 1974).

| Radiación                                    | W m-2 |
|--|-------|
| <i>Incidente</i>                             | 363   |
| Energía en la atmósfera exterior.....        | 254   |
| Energía en la superficie vegetal.....        | 51    |
| Reflejada.....                               | 85    |
| Radiación re-irradiada.....                  | 118   |
| Radiación neta en la superficie vegetal..... |       |
| <i>Usada en la superficie</i>                |       |
| Evaporación.....                             | 101   |
| Calentamiento del aire y las plantas.....    | 10    |
| Calentamiento del suelo.....                 | 5     |
| Crecimiento de la planta.....                | 2     |
|  | 118   |

\* 1 mol de fotones = 1,8 x 10<sup>5</sup> J (a » 650 nm) a 2,7 x 10<sup>5</sup> J (a » 450 nm)

**Tabla 2.** Balance de la radiación diaria sobre un día claro de verano (Tomado de Milthorpe y Moorby, 1974).

En la Figura 3, se compara la distribución espectral de la radiación solar extraterrestre que penetra a una tasa constante de 2 gcal cm<sup>-2</sup>. min<sup>-1</sup> (± 3,5%) con: a) la radiación solar que llega al nivel del mar en un día despejado, b) en un día completamente nublado (luz difusa), y c) luz que se transmite a través de la vegetación (Odum,

1986). La irradiación en un lugar particular depende, en primer lugar, de la latitud. Así, los trópicos, especialmente las regiones de alta presión donde las nubes son pocas, reciben una radiación solar por encima del promedio terrestre; un promedio de 70% de la radiación incidente penetra el aire claro de regiones secas cerca al ecuador. Hacia los polos, la radiación global total anual, disminuye gradualmente. A mayores altitudes, principalmente por la mayor claridad de la atmósfera, una mayor radiación alcanza el suelo con relación al piso de los valles. Más aún, la topografía local y el tiempo, también, son factores importantes que determinan la asequibilidad de la luz, ya que esta es dependiente de la forma del horizonte, las condiciones atmosféricas (nubes, neblinas) y del ángulo de incidencia de la radiación (Larcher, 1995).

Además, Odum (1986), manifiesta que para la mayor parte de la biosfera, la entrada de energía radiante es del orden de 3.000 – 4.000 kcal/m<sup>2</sup>/día; o lo que es lo mismo 1.100 – 1.500 kcal/m<sup>2</sup>/año. El destino de la energía solar que llega a la biosfera se resume en la Tabla 3, donde se le expresa como porcentajes disipados a través de los procesos fundamentales. DE especial interés es la llamada **radiación neta** en la superficie de la tierra, que viene a representar **la diferencia entre todas las corrientes descendentes de radiación y las corrientes ascendentes** de la misma, que puede lograr valores de un millón de kcal/m<sup>2</sup>/año sobre los océanos y 0,6 kcal/m<sup>2</sup>/año sobre los continentes

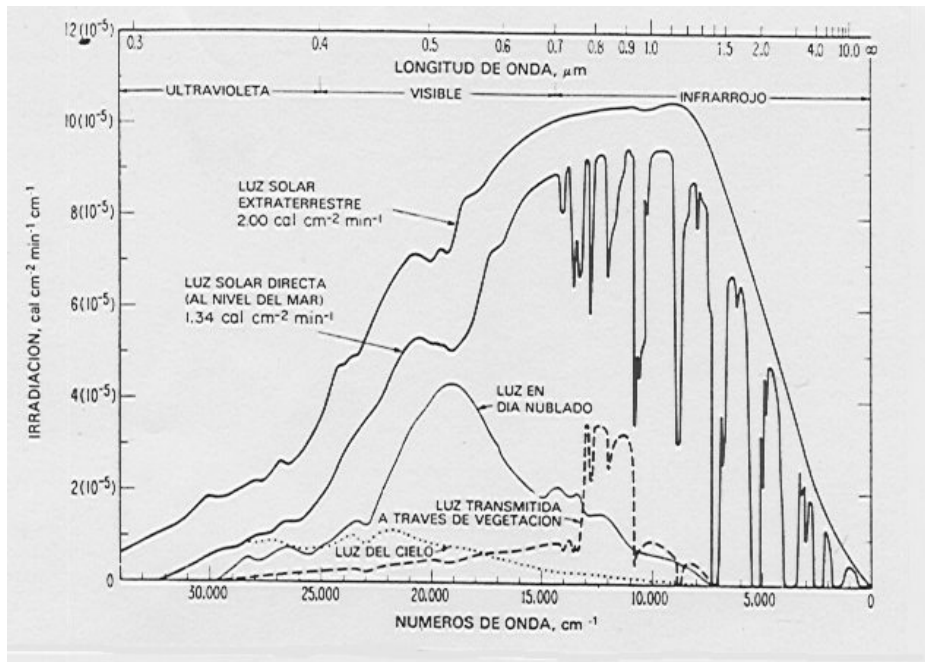
| USO DE LA ENERGÍA                                      | DISIPACIÓN (%) |
|--|----------------|
| Reflejada  | 30,0           |
| Conversión directa en calor                            | 46,0           |
| Evaporación, precipitación                             | 23,0           |
| Viento, olas y corrientes                              | 0,2            |
| Fotosíntesis   | 0,8            |
| Energía de mareas: aproximadamente 0.0017% de la solar |                |
| Calor terrestre: aproximadamente 0,5% del solar        |                |

**Tabla 3.** Disipación de la energía de la radiación solar como porcentajes de entrada anual en la biosfera (Tomado de Odum, 1986. Según Hulbert, 1971)

## 2.2. DISTRIBUCIÓN DE LA RADIACIÓN DE COBERTURA VEGETAL

En un cultivo la luz ingresa mediante un número de capas horizontales de hojas (más estrictamente láminas). La distribución de estas capas con respecto a la altura de la planta, no es regular, las capas más estrechas (ej: la región de mayor densidad), a menudo están cerca del centro, o aún hacia el ápice de la vegetación (Figura 4). (Milthorpe y Moorby, 1974).

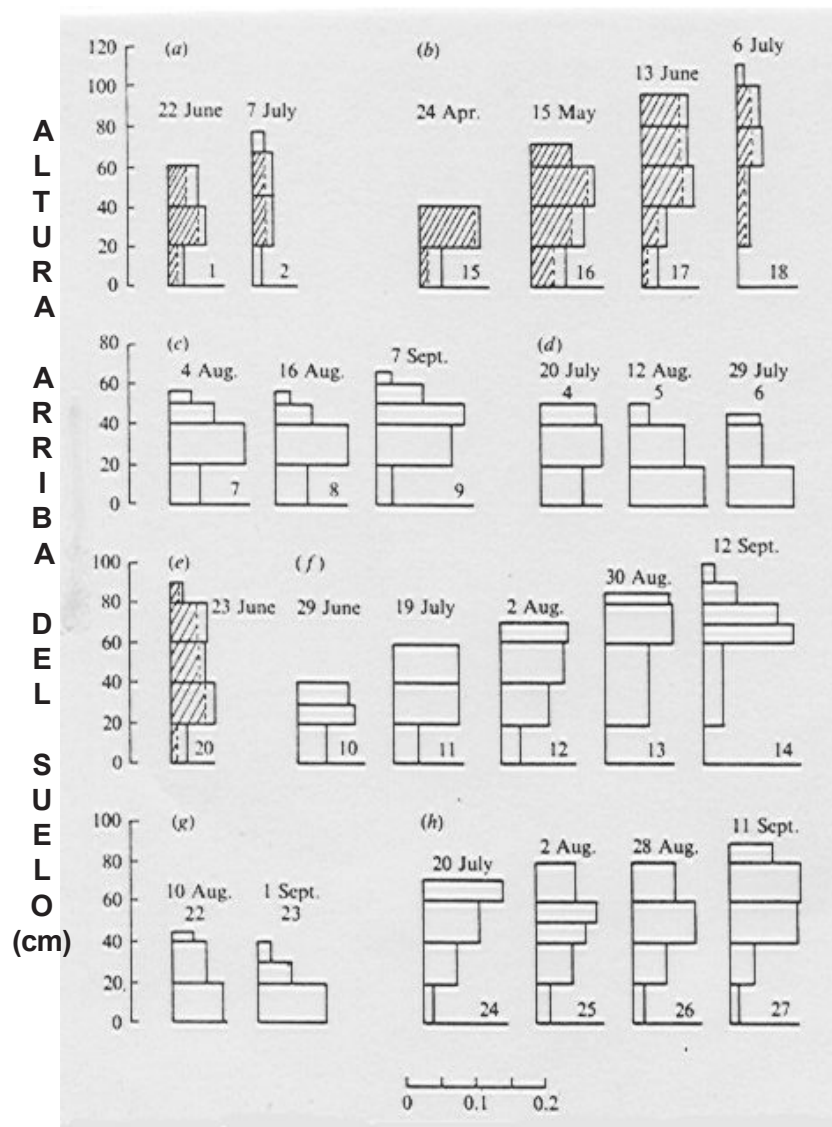
Por otra parte, la radiación incidente sobre las hojas puede separarse en tres componentes: a) radiación directa; b) radiación difusa de la atmósfera y c) radiación difusa en la copa o en el dosel. La irradiación total de las hojas expuestas al sol puede ser establecida por la suma de estos tres componentes; y la de las hojas a la sombra, la sumatoria de las dos últimas (Silveira, 1987). Todas ellas incluyen la radiación visible, la radiación de onda corta total incidente y la radiación de onda larga re-irradiada (Milthorpe y Moorby, 1974).



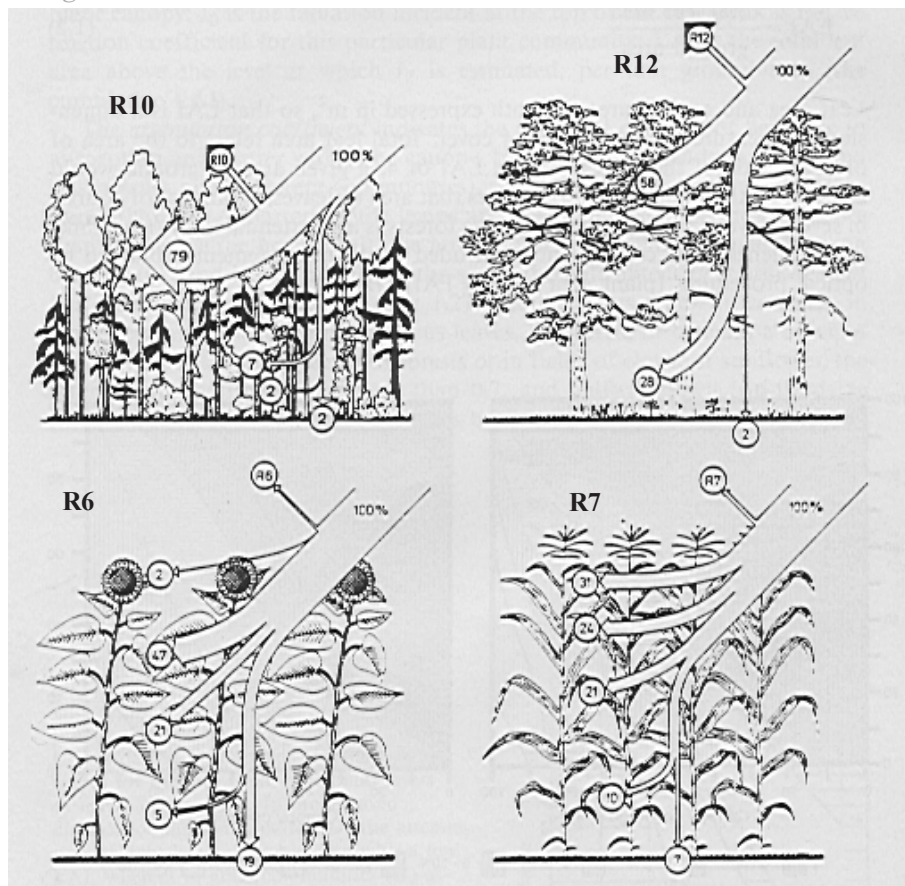
**Figura 3.** Distribución espectral de la radiación solar extraterrestre, de la radiación solar al nivel del mar en un día despejado, de la luz solar en un día completamente nublado y de la energía solar que penetra en un conjunto de vegetación. Cada curva representa la energía que incide en una superficie horizontal (Tomado de Odum, 1986)

Las poblaciones vegetales cerradas construyen un sistema a través del cual se encuentran unas capas sucesivas de hojas traslapadas y otras a la sombra. La luz incidente es absorbida progresivamente en su paso a través de las capas formadas por las láminas foliares, de tal manera que en un dosel espeso es utilizado casi completamente (Figura 5). El arreglo de las hojas durante el crecimiento de los meristemos y el desarrollo foliar, resulta en una estructura que ejerce un *efecto fotohomeostático*, en virtud a su ajuste armónico a la pendiente del gradiente de luz dentro de la copa (Larcher, 1995).

**Figura 4.** Distribución vertical de la densidad de área foliar,  $L_v$ , en varios cultivos. El área foliar dentro de cada capa ( $\text{cm}^2$  de hoja por  $\text{cm}^3$  de volumen del dosel) está dado por las dimensiones horizontales y la profundidad de la capa por la dimensión vertical. (a) 1, 2, cebada, 1960; (b) 15-18, trigo de invierno, 1961; (c) 7-9, remolacha azucarera, 1960; (d) 4-6, papa, 1960; (e) 20, trigo de primavera, 1961; (f) 10-14, col, 1960; (g) 22-23, papa, 1961; (h) 24-27, col, 1961. Cultivos en Inglaterra (Tomado de Milthorpe y Moorby. Según Leach, G. J. & Watson, D. J., 1968. *J. Appl. Ecol.* 5, 381-408)



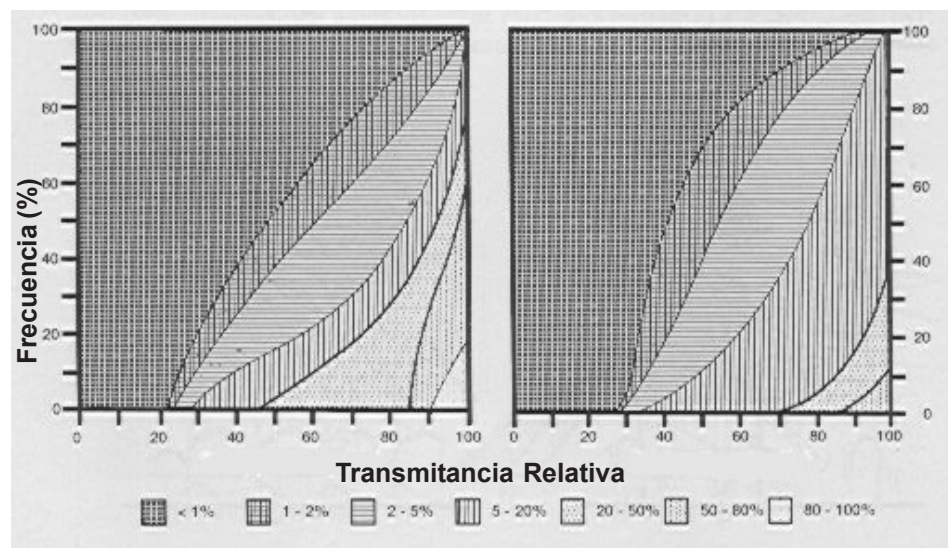




**Figura 5.** Atenuación de la radiación en varias poblaciones vegetales. Arriba a la izquierda: Un bosque boreal; arriba a la derecha: bosque de pinos, ralo; debajo a la izquierda: campo de girasol; debajo a la derecha: campo de maíz. R reflectancia del dosel. La mayoría de la radiación que penetra una cobertura densa, es absorbida y dispersada en el tercio superior; mientras que en poblaciones con hojas erectas estrechas, la radiación es distribuida suavemente (Tomado de Larcher, 1995).

La radiación incidente alcanza, de manera variada, el interior de una población de plantas. Puede entrar como radiación directa a través de los agujeros que se presentan en el dosel, así como en los márgenes de la población (Figura 6); igualmente como luz dispersada después de la reflexión por las hojas y la superficie del suelo y; finalmente, en su paso a través de la lámina foliar. La **atenuación de la radiación**, en una población de plantas, depende principalmente de la densidad del follaje (área por unidad de volumen,

$L_v$ ), del arreglo de las hojas dentro de la población y de la inclinación de las hojas con respecto a la radiación incidente. El grado de prorratio puede ser expresado cuantitativamente por el *índice de área foliar* (IAF). El IAF acumulativo indica el área total de las hojas arriba de una cierta área de suelo. La radiación que entra en los bosques, también, es atenuada por los troncos y las ramas de los árboles (Larcher, 1995 y Milthorpe y Moorby, 1974).



**Figura 6.** Distribución de la penetración de la RAF a través de agujeros en el dosel en un bosque de coníferas y caducifolios sobre un día soleado (izquierda) y un día nublado (derecha) en verano. *Transmitancia relativa*: intensidad de luz debajo del dosel en porcentaje de la máxima irradiación en campo durante un día claro de verano (Tomado de Larcher, 1995, según Tselniker, 1968)

El mismo autor expresa que, a través del dosel de la planta, la radiación pasa por capas sucesivas de hojas. En el proceso, su intensidad disminuye casi exponencialmente a medida que se incrementa la cobertura vegetal en concordancia con la **Ley de Extinción de Beer-Lambert**. Si las capas del follaje se toman como homogéneas, la disminución de la radiación puede ser

calculada de la modificación de la ecuación de extinción, hecha por Monsi y Saeki

$$I_z = I_0 \cdot e^{-k \cdot \text{IAF}}$$

$I_z$  = intensidad de la radiación a una cierta profundidad del ápice del dosel de la planta



$I_0$  = radiación incidente en el ápice del dosel

$k$  = coeficiente de extinción para esta comunidad particular de plantas

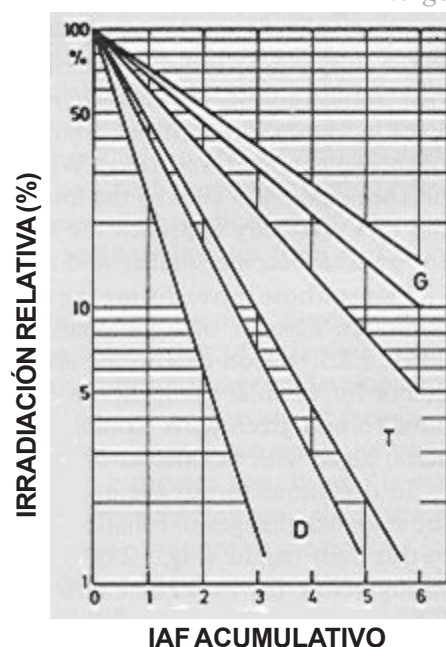
IAF = índice de área foliar acumulativo arriba del nivel en el cual se estima  $I_z$

Larcher, 1995, manifiesta que el *coeficiente de atenuación* indica el grado de disminución de la luz debido a su absorción y dispersión dentro del dosel. En campos de cereales, praderas, cañaverales, donde las hojas son principalmente erectas (más de  $\frac{3}{4}$  de las hojas son erectófilas, en un ángulo con la horizontal superior a los  $45^\circ$ ), el *coeficiente de atenuación* se encuentra, usualmente, entre 0,3 y 0,5 y en el medio de la población la intensidad de la luz es inferior a la mitad de la luz externa (Figura 7: tipo Poaceae). En contraste, en comunidades vegetales con hojas planófilas, como es el caso del sotobosque, o en campos de trébol (*Tripholium repens*) y girasol (*Helianthus annuus* L.), el *coeficiente de atenuación* es mayor a 0,7, de tal manera que en la mitad de la copa de los vegetales, se ha absorbido  $\frac{3}{4}$  de la luz incidente sobre las plantas (Figura 7: tipo dicotiledóneas). En bosques con copa estrechamente compacta y follaje denso, tanta luz es absorbida en las capas superiores, que muy poca luz llega a nivel del tronco y al piso del bosque; en ellos, el *coeficiente de atenuación de luz* es similar o, aún más abrupto, que debajo de las dicotiledóneas herbáceas. Los bosques compuestos de especies arbóreas con copa poco compacta o rala (abedules, eucaliptos) atenúan la luz como las comunidades Poaceae. En plantaciones hortícolas y agrícolas, la atenuación depende de la densidad de siembra y la distancia entre los surcos, de tal manera que se pueda lograr una mejor absorción de luz con un cuidadoso espaciamiento

La intercepción de la radiación en una población puede, también, ser caracterizada en términos del espacio ocupado por el follaje. La *densidad del follaje* es calculado del área total foliar y el volumen de la población (Larcher, 1995). La máxima densidad de la lámina (área por unidad de volumen),  $L_v$ , puede variar desde  $1 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-3}$  en un cultivo frondoso como el trébol (*Tripholium repens*) hasta  $0,02 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-3}$  en una población de maíz (*Zea mays*), o llegar a  $0 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-3}$  en las capas inferiores donde las hojas están senescentes o no existen; raramente es más del 1% del total del volumen del dosel (Milthorpe y Moorby, 1974). Un campo de maíz, con un IAF de 4,2 es de  $2,6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ , mientras que para bosques siempre-verdes subtropicales con IAF de 7 es,  $2,5$  a  $3,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$  porque el *coeficiente de atenuación* en la copa es alto (aproximadamente 0,8), cae abruptamente alrededor del tronco donde hay pocas hojas

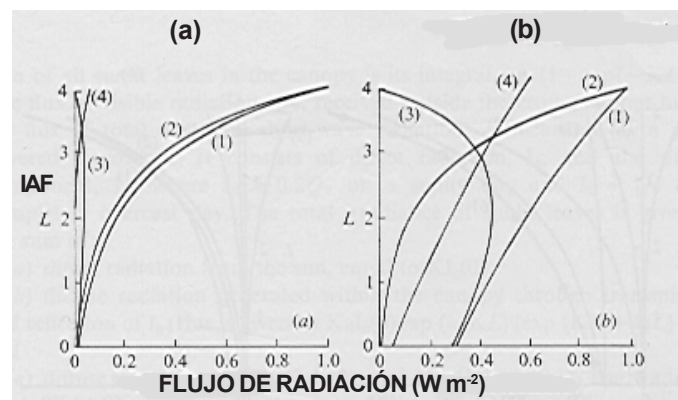
### 2.3. RECEPCIÓN DE LA RADIACIÓN POR LAS HOJAS (REFLEXIÓN, ABSORCIÓN Y TRANSMISIÓN)

En consideración a lo anterior se tiene, según Milthorpe y Moorby (1974) que, del flujo de radiación de una composición espectral específica recibida en el ápice de la vegetación, una parte del mismo pasa a través de los agujeros entre las hojas y otra parte incide directamente sobre ellas; de esta última, una proporción es reflejada y otra es transmitida. También hay un flujo hacia arriba, proveniente de la radiación reflejada por las hojas (Figura 8) y la reflexión de la superficie del suelo, el cual igualmente, se debe tener en cuenta para conocer la energía total asequible en cada capa del follaje. Ella incluye: la radiación de onda corta y el intercambio de radiación de onda larga. El flujo hacia arriba de la radiación de onda larga fuera del dosel es siempre mayor que el



**Figura 7.** Disminución exponencial de la intensidad lumínica en diferentes poblaciones vegetales como función del IAF. El IAF acumulativo es derivado de la sumatoria de valores de índices para capas horizontales individuales de hoja en la población. En comunidades dicotiledóneas (D) de hoja ancha la atenuación de la luz es considerable, aún con bajo IAF, mientras que en comunidades Poaceae (G) la atenuación ocurre gradualmente. Poblaciones de árboles (T) representan una posición intermedia (Tomado de Larcher, 1995).

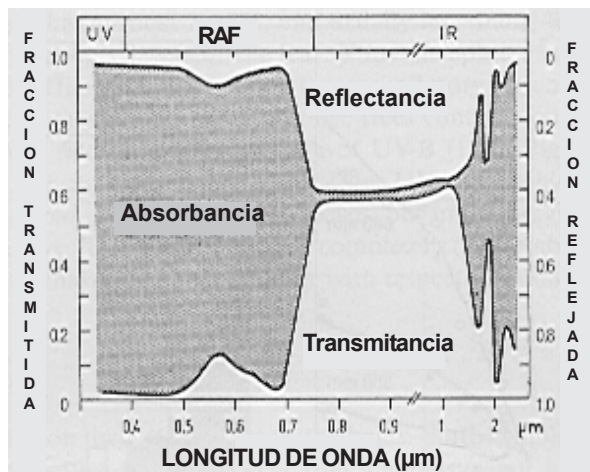
flujo hacia abajo desde el cielo (aproximadamente 1,2 veces con vegetación transpirando en un día claro y cálido).



**Figura 8.** Flujos de radiación solar en un dosel de hojas horizontales como función acumulativa del IAF, relativa al flujo hacia abajo de la radiación en el ápice del dosel. (1) Es el flujo total de la radiación hacia abajo; (2) es la parte de este flujo debida a la radiación no interceptada y (3) la parte debida a la radiación dispersada hacia abajo por las hojas; (4) es el flujo hacia arriba de la radiación debida a la dispersión por las hojas y la reflexión por la superficie del suelo. En (a) el coeficiente de dispersión por las hojas y el coeficiente de reflexión por la superficie del suelo son valores apropiados a la radiación en la banda  $0,31 - 0,73 \mu\text{m}$ ; en (b) los valores son apropiados en la banda  $0,73 - 1,2 \mu\text{m}$ . (Tomado de Milthorpe y Moorby, 1974. Según Cowan, 1968, *J. Appl. Ecol.* 5, 367-79).

Igualmente, Larcher (1995), conceptúa que la forma de crecimiento (modo de ramificación) y el arreglo de las hojas determinan el campo individual de luz en el cual una planta vive. La mayoría de las plantas orientan sus *superficies asimilatorias*, de tal manera que unas pocas hojas están continuamente expuestas a radiación directa y la mayoría de ellas en semi-sombra, donde reciben una luz difusa. Además, de la radiación que cae sobre el dosel, algo es reflejado, otra parte es absorbida y el remanente es transmitido a los estratos inferiores (Figura 9).

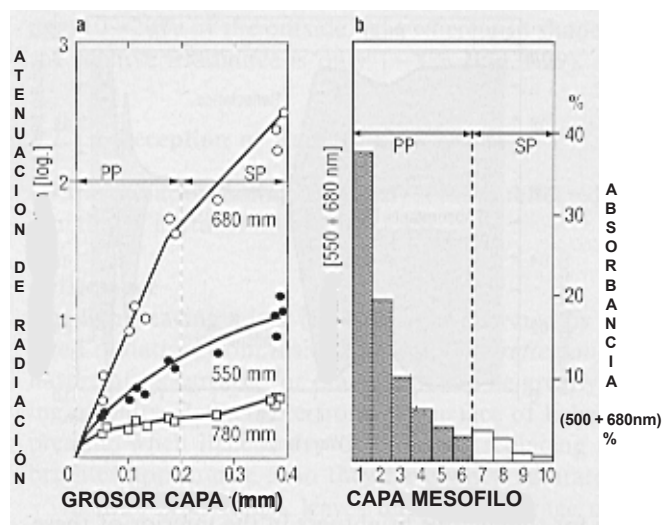
**Reflectancia.** La luz que se aleja de una hoja parcialmente es reflejada por la superficie y otra parte es dispersada dentro del dosel. La *reflectancia* de una hoja depende de la naturaleza de su superficie, la cual puede ser incrementada grandemente por una densa cobertura de pilosidades. En el rango *visible*, las hojas reflejan un promedio de 6 – 10% de la radiación incidente. Las hojas brillantes de ciertas especies arbóreas del bosque lluvioso tropical pueden reflejar más del 12 – 15% de la luz visible. La luz verde es fuertemente reflejada (10 – 20%); la naranja y la roja, menos (3 – 10%); poca radiación *ultravioleta* es reflejada por las hojas (3% o menos); mientras que en el rango del *infrarrojo*, es reflejada el 70% de la radiación incidente perpendicularmente (Larcher 1995).



**Figura 9.** Reflectancia, transmitancia y absorbancia relativa de un vegetal como una función de la longitud de onda (Tomado de Larcher, 1995).

**Absorbancia.** La mayor parte de la radiación que penetra una hoja es absorbida por ella. En su *paso a través de una hoja* la cantidad de radiación que alcanza capas sucesivas de células disminuye exponencialmente (Figura 10). La luz en los espacios intercelulares es reflejada totalmente. Dependiendo de la estructura foliar y del contenido de los cloroplastos de las células del mesófilo, las hojas absorben, generalmente, del 60 – 80% de la RAF. La absorción de la luz visible depende, primariamente, de los pigmentos cloroplásticos, por consiguiente, la curva espectral de absorbancia de las hojas, muestra máximos que coinciden con los máximos de absorción de la clorofila y los carotenoides. La mayor parte de la *radiación ultravioleta* es retenida por las capas externas, cuticular y suberizada, de la epidermis, así como por compuestos fenólicos en las células de la savia de las capas celulares superiores, de tal manera que al menos 2 – 5% y usualmente menos del 1% de la radiación UV alcanza las capas más profundas de la hoja. Así, la epidermis y las capas pilosas actúan como un eficiente filtro UV para el parénquima asimilatorio. Por encima

de los 2.000 nm, poco *infrarrojo* es absorbido por las hojas, pero en el rango de la radiación calórica de onda larga, arriba de los 7.000 nm es absorbida (97%) casi completamente, actuando el vegetal como un “cuerpo negro” con respecto a la radiación (Larcher 1995).



**Figura 10.** Atenuación de la radiación dentro de las hojas. **a** atenuación (logaritmo negativo de la transmitancia) en el parénquima de empalizada (PP) y en el parénquima esponjoso (SP) de las regiones del verde (550 nm), del rojo (680 nm) y del rojo lejano (780 nm) del espectro. **b** absorción de radiación en capas sucesivas del mesófilo (Tomado de Larcher, 1995. Según Terashima y Saeki, 1985)

Al respecto, Odum (1986), manifiesta que la fresca y marcada sombra de los bosques se debe a la absorción de las luces visible e infrarroja lejana en el dosel de las copas. La clorofila, en especial, absorbe las luces azul y roja (0,4 – 0,5  $\mu\text{m}$  y 0,6 – 0,7  $\mu\text{m}$ , respectivamente); el agua presente en las hojas y el vapor de agua que las rodea absorben la energía térmica del infrarrojo lejano. En consecuencia, las plantas verdes absorben con eficacia la luz azul y roja, que es la más útil para fotosíntesis.

Milthorpe y Moorby (1974) afirman que bajo las condiciones de cielo claro y un alto flujo de radiación de onda corta, los perfiles de absorción de radiación visible y radiación neta total son muy similares. Esto surge, principalmente, por la insignificante absorción en la banda de 0,7 – 1,2  $\mu\text{m}$  y en el hecho de que la absorción en la banda de 1,2 – 5,5  $\mu\text{m}$  es compensada, largamente, por la pérdida neta de radiación de onda larga.

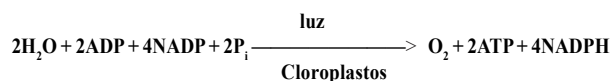
**Transmitancia.** La transmitancia de las hojas depende de su *estructura y grosor*. Hojas suaves y flexibles transmiten 10 – 20% de la radiación solar, hojas muy delgadas transmiten hasta 40%, pero casi nada (menos del 3%) las hojas gruesas y ásperas. La transmisión es mayor en las *bandas de onda larga* donde la reflexión es mayor; esto es, en el verde y, particularmente, en el cercano infrarrojo (CIR). Por tanto, la radiación filtrada a través del follaje es, particularmente, rica en ondas largas, alrededor de 500 nm y por encima de los 800nm. Debajo de un dosel de hojas, prevalece un rojo-verdoso y en los estratos inferiores de un bosque denso, permanece, únicamente, radiación rojo lejano e infrarrojo (Larcher, 1995).

### 3. ASPECTOS FOTOQUÍMICOS DE LA FOTOSÍNTESIS

Según Milthorpe y Moorby (1974) del 85 al 90% de la materia seca de los vegetales es carbono derivado de la fotosíntesis: reducción del dióxido de carbono dependiente de la luz. El proceso global de fotosíntesis puede considerarse en términos de tres procesos parciales, los cuales varían en diverso grado, están interrelacionados y dependen de los factores ambientales internos y externos al vegetal.

El primero de estos procesos es la difusión del  $\text{CO}_2$  hacia los cloroplastos; la más importante resistencia que gobierna esta fase, está asociada con el movimiento a través de los estomas; además, factores ambientales, tales como la intensidad de la radiación, e internos como el potencial hídrico de la hoja, influyen en la apertura estomática y por consiguiente en la resistencia a la difusión de este gas.

El segundo proceso es el fotoquímico, el cual envuelve la interceptación de la luz por los varios pigmentos cloroplásticos. La energía lumínica, con el fosfato inorgánico  $\text{P}_i$ , es usada en la fotólisis del agua para producir oxígeno molecular, fosfato de nicotinamida adenina dinucleótido, NADPH, y trifosfato de adenosina, ATP, la reacción completa es:



El proceso es controlado por la cantidad de radiación absorbida por los cloroplastos y no es afectado por la concentración de  $\text{CO}_2$  o la temperatura

En la tercera fase de la fotosíntesis el NADPH y el ATP producidos en la luz son usados para reducir  $\text{CO}_2$  a carbohidratos y otros compuestos

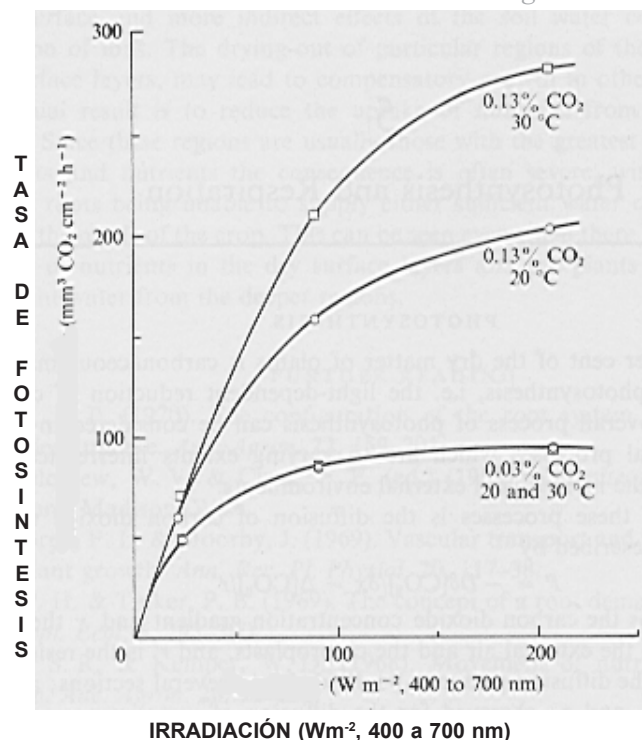


Esta reducción puede ocurrir en la oscuridad y es dependiente de la temperatura. La reacción global fotosintética se puede escribir así:



La interacción entre los tres procesos se ilustra en la Figura 11. A bajas irradiaciones son limitantes los procesos fotoquímicos y la tasa fotosintética depende de la irradiación. A medida que se incrementa la irradiación, el abastecimiento de  $\text{CO}_2$  llega a ser más importante y eventualmente limitante. A concentraciones atmosféricas normales de  $\text{CO}_2$  (0,03%) hay poco efecto de la temperatura sobre la tasa de fotosíntesis. A altas irradiaciones y altas concentraciones de  $\text{CO}_2$  (0,13%), la temperatura y, presumiblemente, los procesos bioquímicos llegan a ser limitantes y un incremento de  $20^\circ\text{C}$  a  $30^\circ\text{C}$  produce un aumento del 50% en la tasa de fotosíntesis (Milthorpe y Moorby (1974).

Los mismos autores continúan afirmando que, únicamente, la radiación absorbida puede ser usada en fotosíntesis y la longitud de onda de esta radiación es dependiente de los varios pigmentos en la planta, y se encuentra, usualmente, en el rango de 400 – 700 nm. La cantidad de radiación absorbida es una función de las concentraciones de los pigmentos y su arreglo en los cloroplastos.



**Figura 11.** Efectos de la irradiación, la temperatura y la concentración de  $\text{CO}_2$  sobre la tasa de fotosíntesis (Tomado de Milthorpe y Moorby (1974). Según Gastar, P. (1962). *Neth. J. Agric. Sci.* 10, 311-24)

#### 3.1. BALANCE ENERGÉTICO EN LA CAPTACIÓN DE ENERGÍA SOLAR POR LOS VEGETALES

Aunque hasta este punto la luz ha sido considerada en términos del movimiento de una onda, su absorción y utilización en fotosíntesis es mejor considerarla en términos de la absorción de una serie de partículas o quanta. El contenido energético de un quantum es dependiente de la frecuencia de la radiación,  $\nu$ , (Tabla 4) y las relaciones entre ellas están dadas por:

$$E = h\nu$$

Donde  $E$  es el contenido energético del quantum ( $\text{erg quantum}^{-1}$ ) y  $h$  es la constante de Planck ( $6,625 \times 10^{-27} \text{ erg s}$ )

La energía luminosa es captada por los pigmentos fotosintéticos (clorofilas y carotenoides) los cuales se encuentran dispuestos ordenadamente en las membranas lipoprotéicas internas de los cloroplastos (tilacoides). La energía lumínica se utiliza en hacer funcionar los fotosistemas de las unidades fotosintéticas, los cuales actúan como “motores fotoeléctricos” que elevan la energía potencial de los electrones, desde el nivel que tienen en la molécula de agua ( $E_0 = 0,8 \text{ volts}$ ) hasta los niveles que tienen en los compuestos orgánicos ( $E_0 = -0,43 \text{ volts}$  para el carbono reducido). La energía necesaria para elevar el potencial de un mol de electrones es de 1.23 volts sobre el nivel inicial equivalente a unas 30 kcal. Los compuestos reducidos por los electrones procedentes del agua, intervienen en la reducción del  $\text{CO}_2$  y originan, como consecuencia, compuestos ricos en energía (azúcares inicialmente), que luego son utilizados para satisfacer las necesidades energéticas o plásticas de los vegetales o de los consumidores de éstos (Weier *et al.*, 1983).



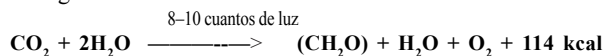
| Longitud de onda (nm)-1                        | 400                  | 500                 | 600                   | 700                   |
|--|----------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| Número de ondas (cm-1)                         | $25 \times 10^3$     | $20 \times 10^3$    | $16,7 \times 10^3$    | $14,3 \times 10^3$    |
| Frecuencia (s-1)                               | $7,5 \times 10^{14}$ | $6 \times 10^{14}$  | $5,0 \times 10^{14}$  | $4,5 \times 10^{14}$  |
| Contenido de energía por Quantum (J quantum-1) | $5 \times 10^{-19}$  | $4 \times 10^{-19}$ | $3,3 \times 10^{-19}$ | $2,9 \times 10^{-19}$ |

**Tabla 4.** Propiedades de la radiación de diferentes longitudes de onda

### 3.2. CONVERSIÓN DE ENERGÍA POR FOTOSÍNTESIS

La transferencia de electrones desde el agua hasta la reducción del  $\text{CO}_2$  se realiza por medio de dos fotosistemas que actúan en cadena, de manera que uno de ellos, el fotosistema I es el que comunica a los electrones la energía necesaria para reducir el  $\text{CO}_2$  y el otro, el fotosistema II es el que suministra al fotosistema I los electrones procedentes del agua, según se puede apreciar en la Figura 12 (Weier et al, 1983). Para reducir una molécula de  $\text{CO}_2$  y transformarla en azúcar, se necesita elevar la energía potencial de 4 electrones procedentes del agua, a través de los dos fotosistemas, por lo que teóricamente se necesitarán como mínimo 8 cuantos de luz.

En consecuencia, la ecuación global de la fotosíntesis puede resumirse de la siguiente forma:

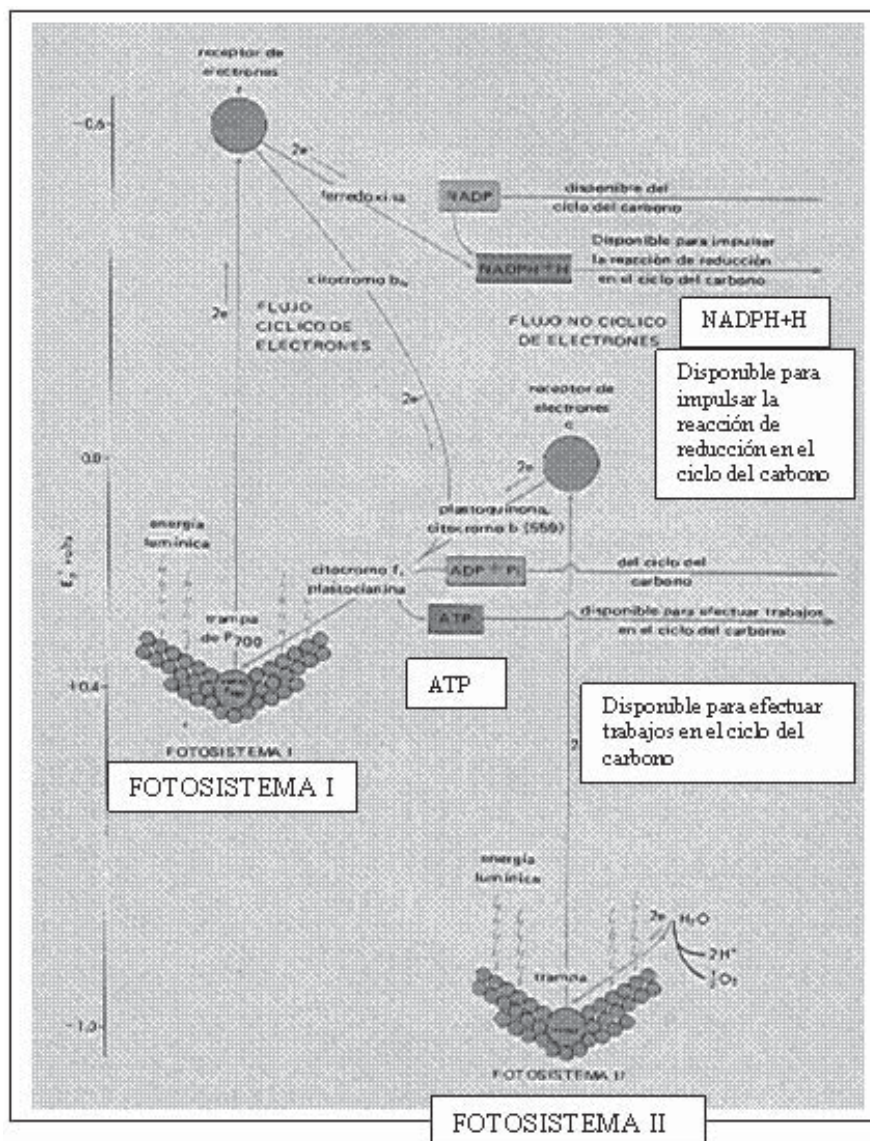


Considerando la luz roja de 660 nm (43.4 Kcal.einsten), el rendimiento teórico de la fotosíntesis, admitiendo un requerimiento de 8 cuantos, sería de:

$$(114 / 43,8 \times 8) 100 = 32,8\%$$

E0  
voltios

**Figura 12.** Diagrama que muestra la disposición de los fotosistemas I y II. El flujo cíclico de electrones incluye solo al fotosistema I. El ATP puede generarse; pero no se libera  $\text{O}_2$ , ni se reduce el NADP. El flujo no cíclico de electrones incluye los dos sistemas. Los electrones del agua pasan por todo el sistema de portadores de electrones. El NADP se reduce, se libera  $\text{O}_2$  y puede formarse ATP. (Tomado de Weier et al, 1983)



Lo anterior es expresado por Larcher (1995) como eficiencia de la fotosíntesis en la utilización de la energía solar, conocido, también, como eficiencia en el uso de la radiación,  $EUR_F$ , e indica la proporción de la energía radiante absorbida, fijada en forma de enlaces químicos

$$EUR_F = \frac{\text{Energía química almacenada}}{\text{Energía radiante absorbida}} \quad 100 (\%)$$

Igualmente, Larcher (1995) conceptúa que, la  $EUR_F$  puede ser calculada de los *requerimientos cuánticos* para los procesos fotoquímicos. El número de quanta de energía (fotones), requeridos para liberar una molécula de  $O_2$  es 8; la producción de una molécula de glucosa requiere 48 fotones. De la relación de 2.874 kJ (contenido energético de una molécula de glucosa) a 8.642 kJ (contenido en 48 moles de fotones en el rango de longitud de onda de 400 – 700 nm), se obtiene un valor teórico de 33,2 % para eficiencia máxima posible de fotosíntesis. Experimentalmente se han obtenido valores, usando cloroplastos aislados o suspensiones de células, bajo condiciones óptimas y saturación de  $CO_2$ , cantidades de aproximadamente 30%, ya que hay inevitables pérdidas de energía en los procesos fotoquímicos, primariamente en forma de calor. Bajo condiciones óptimas similares, en el laboratorio, la eficiencia en fotosíntesis bruta fue, alrededor, del 24% en hojas de plantas  $C_4$  y cerca del 14% en hojas de plantas  $C_3$ . En un *ambiente natural donde*, a causa del bajo contenido en  $CO_2$ , donde los procesos secundarios son limitantes para la fotosíntesis, la  $EUR$  de *fotosíntesis bruta*, se estima entre 8 y 10%. Después de sustraer las pérdidas respiratorias la  $EUR$  remanente de fotosíntesis neta es  $S_{\frac{1}{2}}$  a  $\frac{1}{2}$  de la fotosíntesis bruta (Tabla 4)

Si en lugar de luz roja consideramos la luz azul de 450 nm (63.6 kcal. einstein<sup>-1</sup>) aplicando un cálculo análogo habríamos obtenido un rendimiento del 22.4%. Los cálculos anteriores se han realizado considerando una radiación monocromática que sea totalmente absorbida por los pigmentos de los fotosistemas. En ciertas algas iluminadas con luz roja de baja intensidad, se ha llegado a obtener, experimentalmente, rendimientos cercanos al 30% (Fernández, J., 1988)

De la totalidad de la radiación solar que llega a la superficie de la tierra, solamente una parte, la comprendida entre 400 y 700 nm (RAF), es fotosintéticamente activa para las algas y vegetales superiores, lo que constituye el 43% del total de la energía de la radiación solar. Por lo tanto, cuando se quiera determinar el

rendimiento de la fotosíntesis, respecto a la radiación solar, es necesario especificar si se hace respecto a la RAF solamente o respecto a la radiación total. En el primer caso, los valores serán 2.3 veces mayores a los obtenidos en el segundo. Por ello, los rendimientos se refieren a la RAF

Cuando la intensidad lumínica es baja, en general, se obtienen eficiencias fotosintéticas más altas que cuando aquella es alta, debido, principalmente, a un efecto de saturación de los fotosistemas que hace que disminuyan los rendimientos, aunque se consigan mayores producciones totales. El nivel de saturación lumínica de las plantas, no solamente depende de la naturaleza de estas (umbrofitas o heliofitas), sino que además esta muy condicionado por los factores ambientales (concentración de  $CO_2$ , temperatura y humedad, principalmente).

Si la iluminación es muy intensa y hay déficit de  $CO_2$ , se produce el proceso de la fotorespiración, por el que una parte de los productos fotoasimilados se destruyen y hacen disminuir considerablemente el rendimiento energético global. A nivel de las hojas, en un día soleado, la eficiencia fotosintética puede estimarse entre 15 y 17% respecto a la PAR que les llega. Si en lugar de una hoja se considera la planta completa durante todo un día de permanencia en el terreno, la eficiencia fotosintética sería de 2 a 5%, ya que en este caso se producirían pérdidas considerables en los procesos de absorción, translocación y respiración oscura, además de los propios del metabolismo general.

Si se considera la eficiencia fotosintética de una plantación, teniendo en cuenta la permanencia de ésta y la materia orgánica cosechable, la eficiencia resulta considerablemente menor.

### 3.3. EL CONTENIDO DE ENERGÍA DE LA MATERIA VEGETAL

Mientras más contenido de carbono tenga una sustancia, mayor es su contenido energético; las sustancias más importantes de las plantas con un alto contenido de carbono son los lípidos (38,9 kJ g<sup>-1</sup>), lignina (26,4 kJ g<sup>-1</sup>), y una variedad de productos del metabolismo secundario como proteínas (23,0 kJ g<sup>-1</sup>) y terpenos (46,9 kJ g<sup>-1</sup>). Los principales factores que determinan el *contenido de energía de la materia seca* son: el nivel de organización, la forma de vida y las características químicas de la planta, determinadas genéticamente. Las plantas leñosas son más ricas en energía que las especies herbáceas, la fitomasa de las coníferas contiene más energía que los árboles angiospermos; las monocotiledóneas más pobres en energía que las dicotiledóneas leñosas (Larcher, 1995)

| Pérdidas de energía debido a:   | Pérdida relativa |
|---|------------------|
| Energía solar de longitud de onda de la RAF (400-700nm) .....   | 50               |
| Reflexión y transmisión .....   | 5 – 10           |
| Absorción por tejidos y estructuras fotosintéticamente inactivos (paredes celulares, pigmentos no fotosintéticamente activos) ..... | 2,5              |
| Absorción de radiación por los fotosistemas I y II (calor, fluorescencia) .....   | 19 – 22          |
| Fotorespiración .....   | 2,5 – 3          |
| Respiración oscura  |                  |
| Plantas C3 .....  | 3,7 – 4,3        |
| Plantas C4 .....  | 4,9 – 5,8        |

**Tabla 4.** Pérdidas de energía (en % total de la radiación global) debida a la asimilación del carbono por las plantas (Tomado de Larcher, 1995, según Beadle and Long, 1985)

### 3.4. REGULACIÓN DE LA ENERGÍA LUMÍNICA FOTOSINTÉTICA.

En la naturaleza, la intensidad de la luz o densidad de flujo fotónico fotosintético (DFFF), muestra una gran variación, tanto temporal como espacialmente, de tal manera que se pueden experimentar cambios en la DFFF hasta de 100 veces en pocos segundos. Tal es el caso cuando hay nubes intermitentes, lo cual conduce a que el flujo fotónico integrado diario varíe grandemente entre habitats, así como dentro del dosel de una población vegetal dada. Las plantas en el piso de un bosque tropical lluvioso pueden recibir una DFFF tan baja como el 1% de la radiación incidente en el ápice del dosel (Björkman y Demming-Adams, 1995).

Los mismos autores continúan afirmando que esta gran variación en el ambiente lumínico impone una gran exigencia sobre la sensibilidad del sistema fotosintético. A DFFF limitantes para fotosíntesis, la luz debe ser capturada y utilizada con la más alta eficiencia posible. Por otra parte, es imperativo evitar la sobreexcitación de los centros de reacción fotosintéticos cuando la luz llega a ser excesiva, pues se pueden ocasionar severos daños a estos centros (daño fotoinhibitorio). Este problema es más grave en presencia de estrés ambientales que disminuyen la capacidad para saturación de luz de fotosíntesis, como resultado de un incremento *excesivo* en el nivel energético de la luz. Es el caso de la sequía que conduce a una disminución del  $\text{CO}_2$  asequible para fijación del carbono, por su efecto sobre la conductancia estomática. En consecuencia las plantas deben poseer la habilidad para regular el nivel de excitación energética, a corto y largo término.

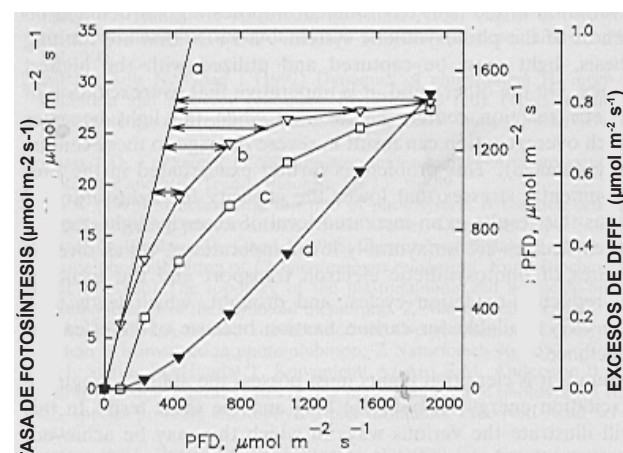
#### 3.4.1 El concepto de excesos en la densidad de flujo fotónico

De acuerdo a (Björkman y Demming-Adams, 1995), la Figura 13 ilustra el grado en el cual la luz llega a ser excesiva, en la medida que la DFFF, incidente sobre una hoja, se incrementa gradualmente hasta la luz solar plena ( $2.000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). A baja DFFF la tasa fotosintética (curva b) se incrementa gradualmente con la DFFF incidente, y a este nivel no hay excesos lumínicos porque todos los fotones absorbidos por la clorofila son utilizados y, así, toda la excitación energética es disipada en fotosíntesis. En la medida en que la DFFF se incrementa más, la tasa fotosintética comienza a desviarse de la pendiente inicial  $m(a)$  de la curva b, porque algo de la luz no es usada en fotosíntesis. El exceso en la DFFF está representada por las flechas horizontales y por la curva d. Cuando se alcanza la plena iluminación el 75% es DFFF en exceso.

Estos investigadores continúan diciendo que la ausencia de cualquier proceso regulatorio de la interceptación de la energía lumínica o la disipación de la excitación energética por una ruta diferente a la fotosíntesis, conduce a que la fracción de los centros del fotosistema II (FS II) que se encuentran en estado reducido (centros cerrados) seguirían la curva c. A plena exposición solar, solamente, el 20% de los centros del FS II permanecería en estado oxidado (centros abiertos) y capaces de realizar procesos fotoquímicos. El 80% remanente permanecería cerrado e incapaces de llevar a cabo procesos fotoquímicos, una situación que predispone a estos centros a daños fotoinhibitorios.

#### 2.2.2 Regulación de la interceptación de la luz

Según Björkman y Demming-Adams (1995), hay cuatro diferentes maneras a través de las cuales pueden lograrse cambios en la interceptación de la luz:



DENSIDAD DE FLUJO FOTONICO FOTOSINTÉTICO (DFFF) ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )

**Figura 13.** Desarrollo de excesos en energía lumínica en respuesta a un incremento de DFFF incidente sobre una hoja. La tasa de fotosíntesis está representada por la curva b y la pendiente inicial de esta curva por la línea a. El exceso en la DFFF está dado por las flechas horizontales y por la curva d. El cálculo del grado de cierre de los centros de reacción del fotosistema II (curva c) están basados sobre la (falsa) de que no hay regulación de la interceptación de luz o disipación de la excitación energética (Tomado de Björkman y Demming-Adams, 1995, según Schäfer y Björkman, 1989).

- Cambios en la orientación relativa de la hoja con respecto al haz lumínico. En general, las hojas a la sombra tienen una orientación predominantemente horizontal, mientras que aquellas al sol presenta ángulos agudos, especialmente bajo condiciones de estrés hídrico
- Cambios en la reflectancia foliar. Ello lo logran variando el grado de pubescencia
- Movimientos de los cloroplastos. Su orientación y posición dentro de cada célula depende de la DFF incidente sobre la hoja. Típicamente se organizan perpendicular o paralelamente a la dirección de la luz, dependiendo de su intensidad
- Cambios en el contenido de clorofila y en la capacidad fotosintética. Las hojas a la sombra tienen una mayor densidad de grana por volumen de cloroplastos, cloroplastos grandes y una mayor relación clorofila que cosecha luz a enzimas del estroma, que las hojas desarrolladas en luz brillante

### 4. OBJETIVOS DE LOS BALANCES ENERGÉTICOS EN LOS CULTIVOS

El objetivo de los balances energéticos radica en la posibilidad de comparar situaciones diferentes y aportar datos que sirvan para complementar los de origen económico que van a influir en la toma de decisiones respecto a las modificaciones posibles de un proceso de producción.

Los estudios de los balances energéticos se pueden aplicar tanto sobre cultivos aislados como sobre sistemas de producción. Para ello se pueden realizar los siguientes tipos de comparación:

- a. Comparaciones en el tiempo, teniendo en cuenta la evolución de los métodos de cultivo.



b. Comparaciones en el espacio, para estudiar los efectos de los cambios y modificaciones de la tecnología del cultivo, introducidos en distintas parcelas de una misma unidad de producción.

La ventaja de un análisis energético, en relación con uno económico que tome como unidad de medida un sistema monetario, es la invariabilidad de los datos energéticos en el tiempo frente a las fluctuaciones del valor de la moneda, incluso en períodos relativamente cortos.

Según Fernández, J. (1980), el balance energético puede realizarse en los siguientes casos:

- Plantas aisladas (con fines de investigación básica solamente).
- Cultivo aislado o parcela representativa
- Explotación agrícola en la que se combinen varias técnicas de producción.
- Nivel regional o nacional, para obtener informaciones que ayuden a la toma de decisiones sociopolíticas.
- Nivel mundial, para estudiar el funcionamiento de los ecosistemas que constituyen la biosfera.

## 5. BALANCE ENERGETICO DE LA PRODUCCION DE BIOMASAVEGETAL

La **productividad primaria** de un sistema o una comunidad, se define como la rapidez con que la energía radiante se transforma en sustancias orgánicas por la acción fotosintética de los organismos autotróficos. Según Odum (1986), el proceso productivo tiene cuatro pasos:

- **Productividad primaria bruta** es la tasa fotosintética global en la que se incluye la materia orgánica usada en la respiración. También se conoce como “fotosíntesis total” o “asimilación total”
- **Productividad primaria neta** es la tasa de almacenamiento de materia orgánica en los tejidos vegetales, como resultado de un exceso de producción respecto al consumo respiratorio de las plantas. Esto también se llama “fotosíntesis aparente” o “asimilación neta”
- **Productividad neta de la comunidad** es la tasa de almacenamiento de la materia orgánica no utilizada por los heterótrofos (producción primaria neta menos consumo heterótrofo)
- **Productividades secundarias**, se refiere a las tasas de almacenamiento de energía a nivel de los consumidores

La biosfera, en general es un sistema abierto que sufre la necesaria **entrada y salida de energía**, constituyendo un **ambiente de entrada y uno de salida** acoplados y esenciales para que el ecosistema funcione y se auto-sostenga

Cuando los factores físicos son favorables y sobre todo cuando los subsidios energéticos externos reducen el costo de mantenimiento, se registran elevadas tasas de producción de los ecosistemas naturales y artificiales. Dichos subsidios de energía pueden ser el trabajo del viento, la lluvia en un bosque lluvioso o el combustible fósil y el trabajo humano y animal que se utilizan para obtener una cosecha. Al evaluar un ecosistema debe considerarse la naturaleza y magnitud, no solo de las **fugas de energía** resultantes de los estrés climáticos, de cosecha, contaminación y otros, que restan energía al proceso productivo, sino también de los **subsidios energéticos** que lo incrementan al reducir la pérdida de calor respiratorio (es decir el “bombeo de

desorden” hacia fuera del sistema) necesaria para mantener la estructura biológica (Odum, 1986).

## 5.1. EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA PRODUCCIÓN PRIMARIA DE LAS COMUNIDADES VEGETALES

La *eficiencia en el uso de la radiación* de la producción primaria,  $EUR_{pp}$ , se obtiene del rendimiento energético de la producción primaria bruta y la radiación absorbida por unidad de área de suelo. La *eficiencia* de uso de la energía, usualmente, se expresa como contenido de energía de la producción neta anual como proporción de la RAF total (Larcher, 1995).

El anterior autor expresa que la *producción primaria neta*, de plantas  $C_4$  cultivadas en las explotaciones agrícolas, alcanzan su *eficiencia máxima de productividad* entre el 3% (*Zea mays*) y el 6% (*Panicum maximum*); correspondiendo valores para cultivos  $C_3$ , de 1,5 – 2% (principalmente Fabaceae) a 2 – 4% para Poaceae (cereales) y raíces tuberosas. Bajo condiciones muy favorables, que prevalecen en los bosques lluviosos o en tierras húmedas, las eficiencias son inferiores al 2% y para la mayoría de los bosques y comunidades Poaceae, son menores al 1%. En las regiones expuestas a la más alta irradiación (cerca de los Trópicos de Cáncer y Capricornio), hay poca precipitación y, por esto, la productividad es baja. La energía almacenada en la fitomasa de la tierra (alrededor de  $30 \times 10^{21}$  J) es, aproximadamente, del mismo orden de magnitud de las reservas conocidas de hulla, gas natural y aceite mineral (cerca de  $25 \times 10^{21}$  J).

## 5.2. CONCEPTO DE SUBSIDIO ENERGÉTICO

La alta productividad y las elevadas proporciones entre productividad primaria neta y bruta se mantienen gracias a cuantiosas aportaciones de energía en forma de prácticas agrícolas, riego, fertilización, selección genética y control de agentes bióticos. El combustible que se emplea para mover la maquinaria agrícola constituye un aporte de energía equivalente a la solar; se le puede cuantificar en calorías o caballos de fuerza transformados en calor durante la realización del trabajo de mantenimiento de los cultivos (Odum, 1986).

Cualquier fuente de energía que reduzca el costo de auto-mantenimiento interno del agro-ecosistema, y que de esa manera eleve la cantidad de otra energía que sea susceptible de ser convertida en producción, se denomina **flujo de energía auxiliar** o **subsidio energético**. Por lo general las altas temperaturas (y los grandes estrés de agua) hacen que la planta gaste más de su producción bruta en respiración. Es decir, cuesta más el mantenimiento de la estructura vegetal en los climas cálidos, aunque las plantas  $C_4$  tienen una vía fotosintética que resuelve, parcialmente, esa limitación impuesta por los climas cálidos y secos. Las comunidades naturales que se benefician con los subsidios energéticos naturales son aquellos que tienen la mayor productividad bruta (Odum, 1986)

## 5.3. DISTRIBUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN PRIMARIA

En la Tabla 5 se presenta una lista de ecosistemas selectos (Odum, 1986), cuya secuencia va desde sistemas agrícolas de rápido crecimiento hasta sistemas maduros estables. Los sistemas de rápido crecimiento o “proliferación” (es decir, producción muy rápida por períodos breves), como el alfalfal, tienden a presentar

una producción primaria neta (PPN) elevada y, si se les protege de los consumidores, una alta producción neta de la comunidad. En las comunidades estables, la producción primaria bruta (PPB) tiende a disiparse a través de la combinación de la respiración autótrofa ( $R_A$ ) y la respiración heterótrofa ( $R_H$ ), de modo que la producción neta de la comunidad es baja o nula al término del ciclo anual. Por otra parte, las comunidades con grandes biomásas, como el bosque lluvioso, necesitan una elevada  $R_A$  para su mantenimiento, por lo que la proporción PPN/PPB tiende a ser baja.

con los promedios mundiales. Debido a la variación en el contenido de agua, la mejor manera de comparar los cultivos es con base en el contenido calórico de las cosechas. Los países subdesarrollados tienen baja producción de alimentos por hectárea, ya que no pueden financiar los subsidios de energía necesarios a fin de obtener altos rendimientos. La producción mundial promedio de alimentos está más cerca del extremo inferior que del superior y en los países subdesarrollados los rendimientos no crecen más

|                                       | Alfalfa<br>(U.S.A.) | Plantación de<br>pino joven<br>(Inglaterra) | Bosque de pino-<br>encino de edad<br>media (Nueva York) | Bosque lluvioso<br>maduro (Pto. Rico) |
|---------------------------------------|---------------------|---|---|---------------------------------------|
| Producción primaria bruta (PPB)       | 24.400              | 12.200                                      | 11.500  | 45.000                                |
| Respiración autótrofa (RA)            | 9.200               | 4.700                                       | 6.400   | 32.000                                |
| Producción primaria neta (PPN)        | 15.200              | 7.500                                       | 5.000   | 13.000                                |
| Respiración heterótrofa (RH)          | 800                 | 4.600                                       | 3.000   | 13.000                                |
| Producción neta de la comunidad (PNC) | 14.400              | 2.900                                       | 2.000   | Poca o nula                           |
| Proporción (%) PPN/PPB                | 62,3                | 61,5  | 43,5  | 28,9                                  |
| Proporción (%) PNC/PPB                | 59,0                | 23,8  | 17,4  | 0                                     |

**Tabla 5.** Producción y respiración anuales, en kcal/m<sup>2</sup>/año, en ecosistemas del tipo de crecimiento constantes y en estado de equilibrio (Tomado de Odum, 1986)

Odum (1986) hizo una lista de estimaciones conservadoras de PPB de los principales tipos de ecosistemas, estimaciones de las áreas ocupadas por cada tipo y la productividad bruta global de la tierra y el agua (Tabla 6). Respecto a los valores promedios estimados para las grandes áreas, *la productividad varía en aproximadamente dos órdenes de magnitud ( $10^2$ )*, es decir, de 200 a 20.000 kcal/m<sup>2</sup>/año y la producción bruta global del mundo es del orden de  $10^{18}$  kcal/año.

#### 5.4. USOS HUMANOS DE LA PRODUCCIÓN PRIMARIA

En la Tabla 7 se aprecia, de acuerdo a Odum (1986), los rendimientos y la PPN estimada de los principales cultivos en los países desarrollados y subdesarrollados, los que se comparan

aprisa que la población, ya que cada año aumenta el número de países importadores de alimentos.

En la década del 70, el rendimiento de todos los cultivos en el mundo y los promedios mundiales, aumentaron en promedio un 25%; no obstante, el abismo entre los países desarrollados y en desarrollo no ha disminuido. En el caso de los cereales, la diferencia era de 1.630 kg/ha en 1969 y había crecido a 1.740 kg/ha en 1977. Las tierras de cultivo se han incrementado en 15% en todo el mundo durante el mismo período, pero en Europa, Estados Unidos y Japón el área cultivada se redujo. Los países subdesarrollados han incrementado su alimento disponible por aumento de las tierras agrícolas y por mejoras de los rendimientos. Si esta tendencia continúa, seguirán cultivándose más tierras marginales, lo que significa mayores costos y el riesgo de una degradación ambiental. Por otra parte el contenido de proteínas,

| Ecosistema  | Área (102 km <sup>6</sup> ) | Productividad<br>primaria bruta<br>(kcal/m <sup>2</sup> /año) | Producción<br>bruta total<br>(1016 kcal/año) |
|---|-----------------------------|---|--|
| <b>Marino</b>   |                             |   |  |
| Mar abierto   | 366,0                       | 1.000   | 32,6   |
| Zonas costeras y de surgencia   | 34,4                        | 8.000   | 7,0  |
| Estuarios y arrecifes   | 2,0                         | 20.000  | 4,0  |
| <b>Subtotal .....</b>   | <b>362,4</b>                | <b>---</b>  | <b>43,6</b>                                  |
| <b>Terrestres</b>   |                             |   |  |
| Desiertos y tundras   | 40,0                        | 200   | 0,8  |
| Praderas y pastizales   | 42,0                        | 2.500   | 10,5   |
| Bosques secos   | 9,4                         | 2.500   | 2,4  |
| Bosques boreales de coníferas   | 10,0                        | 3.000   | 3,0  |
| Tierras cultivadas con poco o ningún subsidio energético                | 10,0                        | 3.000   | 3,0  |
| Bosques templados húmedos   | 4,9                         | 8.000   | 3,9  |
| Agricultura subsidiada con combustibles (mecanizada)                    | 4,0                         | 12.000  | 4,8  |
| Bosques tropicales y subtropicales húmedos (de hojas anchas y perennes) | 14,7                        | 20.000  | 29,0   |
| <b>Subtotal .....</b>   | <b>135,0</b>                | <b>---</b>  | <b>57,4</b>                                  |
| <b>Total de la biosfera .....</b>                                       | <b>500,0</b>                | <b>-----</b>  | <b>100</b>                                   |
| <b>Promedio de la biosfera .....</b>                                    | <b>---</b>                  | <b>2.000</b>  | <b>---</b>                                   |

**Tabla 6.** Producción primaria bruta estimada (con base anual) de la biosfera y su distribución entre los principales ecosistemas

|  | Peso de la cosecha<br>(kg/ha) | Contenido calórico<br>(kcal/m <sup>2</sup> ) | Pn estimada<br>(kcal/m <sup>2</sup> ) |
|--|-------------------------------|--|---------------------------------------|
| Trigo (aproximadamente 12% de proteína)  |                               |  |                                       |
| 1. Holanda                               | 5.200                         | 1.715  | 5.150                                 |
| 2. India                                 | 1.400                         | 460  | 1.380                                 |
| 3. Promedio mundial                      | 1.700                         | 560  | 1.680                                 |
| Maíz (aproximadamente 10%)               |                               |  |                                       |
| 1. Estados Unidos                        | 5.700                         | 2.000  | 6.000                                 |
| 2. India                                 | 1.100                         | 385  | 1.150                                 |
| 3. Promedio mundial                      | 2.950                         | 1.030  | 3.090                                 |
| Arroz (aproximadamente 10% proteína)     |                               |  |                                       |
| 1. Japón                                 | 6.200                         | 2.230  | 6.690                                 |
| 2. Brasil                                | 1.450                         | 520  | 1.560                                 |
| 3. Promedio mundial                      | 2.600                         | 950  | 2.850                                 |
| Papa blanca (aprox. 2% de proteína)      |                               |  |                                       |
| 1. Estados Unidos                        | 29.250                        | 2.650  | 5.300                                 |
| 2. India                                 | 11.500                        | 1.050  | 2.100                                 |
| 3. Promedio mundial                      | 14.000                        | 1.250  | 2.500                                 |
| Soya (aproximadamente 30% de proteína)   |                               |  |                                       |
| 1. Canadá                                | 2.550                         | 1.025  | 3.075                                 |
| 2. Indonesia                             | 1.300                         | 525  | 1.575                                 |
| 3. Promedio mundial                      | 1.550                         | 620  | 1.860                                 |
| Azúcar morena (menos del 1% de proteína) |                               |  |                                       |
| 1. Hawai (caña)                          | 18.362                        | 6.740  | 67.400                                |
| 2. Holanda (remolacha azucarera)         | 6.950                         | 2.570  | 25.700                                |
| 3. Cuba (caña)                           | 4.920                         | 1.820  | 18.200                                |
| 4. Promedio mundial                      | 4.140                         | 1.435  | 14.350                                |

**Tabla 7.** Rendimientos anuales (1977) de alimentos y producción primaria neta calculada (Pn) para los principales cultivos alimenticios de contenido protéinicos variables en tres niveles de subsidio energético (Tomado de Odum, 1986)

más que el de calorías totales tiende a limitar la nutrición en el Tercer Mundo. En condiciones equivalentes, el rendimiento de un cultivo rico en proteínas, como la soya, siempre es menor (en calorías totales) que el de un cultivo rico en carbohidratos, como el azúcar o la papa (Odum, 1986)

## 6. ANALISIS DE ENERGÍA Y TRABAJO ENTRE LA AGRICULTURA PRE Y SEMI-INDUSTRIAL

El debate entre la productividad de los modelos de agricultura preindustrial e industrial, aun no ha terminado. Aunque la agricultura industrial y semi-industrial, incorporan grandes cantidades de insumos (incluyendo los carburantes fósiles) y de energía para la producción de alimentos, la relación entre la energía invertida y la energía contenida en los alimentos (Índice Energético, EÅ) es muy baja. Sin embargo, la agricultura industrial tiene la capacidad de generar valores excedentes y producir bajo las condiciones de seguridad alimentaria.

Por su parte, la agricultura pre-industrial tiene gran ventaja desde el punto de vista energético, al producir, en general, con una relación más elevada de Er. En la práctica de este tipo de agricultura, los agricultores tienen que invertir menos energía y tiempo de trabajo para obtener sus alimentos. Esa época preindustrial fue conocida como la “edad de oro del bienestar”.

Leach (1975) afirma que muchos agricultores preindustriales alcanzan elevados rendimientos, dedicando sólo el 15-25% de su jornada diaria a las tareas y trabajos relacionados con la alimentación para pequeñas comunidades o para el consumo doméstico.

La Agricultura Industrial, por su parte, puede alcanzar niveles de productividad de hasta 3000-4000 MJ/hombre/hora, invirtiendo todos los insumos necesarios y la maquinaria en la producción de cultivos para ahorrar de este modo, una enorme fuerza de trabajo.

En esas condiciones pareciera haber una desbordante ventaja de la agricultura semi-industrial sobre la preindustrial, a pesar de los costos elevados que ella conlleva. Sin embargo, la enorme ganancia que se genera, se pierde por dos razones: 1. Gran parte de los cultivos obtenidos van dirigidos al consumo animal que los convierten con una eficacia relativamente baja. 2. El manejo dado al proceso de post-explotación de la cadena de alimentos es ineficiente e introduce pérdidas (especialmente por transporte y distribución) por lo cual se le equipara con la eficacia de la agricultura preindustrial. Esta realidad cuestiona ese tipo de agricultura desde el punto de vista de su sostenibilidad económica y ecológica.

De todos modos y a pesar de que los cultivos preindustriales muestran en todo el mundo balances energéticos más altos, son



finalmente los aspectos inherentes a condiciones geográficas, ecológicas, de suelos y a técnicas de racionalización de uso de trabajo, para controlar plagas, enfermedades, malas hierbas, etc., los que determinan su eficacia y viabilidad. Esto, sin tener en cuenta aspectos extremos como los límites previsibles de reas cultivables y materias primas energéticas.

## 7. ENERGIA Y TIERRA EN LOS MODELOS DE AGRICULTURA

El factor superficie cultivable constituye un elemento fundamental en la mayor producción de alimentos, como función de los flujos energéticos. Experiencias a nivel mundial muestran cómo, sistemas de producción intensivos practicados en distintos lugares, originan balances positivos, es el caso de los huertos familiares utilizados en distintas culturas y del modelo de agricultura china, considerado como el más eficiente de la humanidad y paradigma de la agricultura preindustrial. Por su parte los sistemas semi-industriales no se muestran tan eficaces en cuanto a la utilización del suelo, debido al empleo de carburantes fósiles en la mecanización y fertilización, lo que eleva los inputs energéticos sin que necesariamente se eleven los outputs.

Sin embargo algunas experiencias muestran que la aplicación de inputs técnicos a la agricultura, puede elevar considerablemente los rendimientos con unos beneficios marginales enormes. Este criterio ha sido fundamental para la elaboración de los planes agrarios en la mayoría de los países desarrollados del mundo.

Los sistemas plenamente industrializados se implementan en cultivos básicos, tales como cereales, arroz, papa y remolacha azucarera, entre otros. Sus producciones energéticas contenidas son elevadas y en ocasiones equivalen al mantenimiento de unas 10 a 20 personas/ha (dietas vegetarianas) pero debido a que los inputs energéticos son muy elevados, muestran una tendencia marcada a la disminución de rendimientos.

## 8. HACIA UNA PLENA INDUSTRIALIZACION

Aunque no existen patrones que señalen a un solo sistema de alimentos a nivel mundial como el más eficiente y racional, ya que ninguno posee todas las ventajas comparativas a su favor en los distintos sistemas productivos del mundo, la tendencia que predomina en las tres últimas décadas, es la transición de los modelos agrarios hacia la plena industrialización.

Los esfuerzos se dirigen a aumentar la productividad del trabajo, en los sitios donde el valor del suelo es bajo, mediante el mejoramiento de las técnicas y la mecanización agrícola. Por el contrario, en lugares donde la mano de obra es barata, se han hecho esfuerzos por aumentar los rendimientos de las cosechas, gracias a la incorporación de insumos como abonos y fertilizantes.

En Inglaterra, según Leach (1975), el camino de desarrollo ha sido similar al del resto de Europa y consiste en forzar tanto la productividad del trabajo como de la tierra; ello explica la disminución en cerca de un 50% de la mano de obra agrícola y el crecimiento extraordinario de la maquinaria agrícola.

Pero a pesar del incremento en la inversión de los inputs energéticos, la producción de outputs presenta la misma proporcionalidad. Esto indica que los cambios hacia la plena industrialización y desarrollo de la producción de alimentos, son

bastante inquietantes y no ofrecen una alternativa de solución al problema de la seguridad alimentaria.

## BIBLIOGRAFÍA

ASIMOV, I. 1985. Fotosíntesis. Biblioteca de Divulgación Científica. Barcelona.

BJÖRKMAN, O and B. DEMMIG-ADAMS. 1995. Regulation of photosynthetic light energy capture, conversion, and dissipation in leaves of higher plants. En: Schulze, E. and M. M. Caldwell (eds.). Springer, Berlin. 17 – 47 p.

CUEVAS, A. M. Y SIMBAQUEVA, O. 2002. El brillo solar, factor clave en el rendimiento. Revista Arroz. Fedearroz. 14 – 22 p.

FERNÁNDEZ, J. 1980. La Agricultura como Productora de Energía. Ingeniería Química. Madrid, Nov. 1980. pp. 23-32

LARCHER, W. 1995. Physiological Plant Ecology. Ecophysiology and stress physiology of functional groups. Translated by J. Weiser. Springer. Berlin. Third edition. 506 p.

LEACH, G. 1976. Energía y producción de alimentos. Versión Española M. T. Montes P. (Licenciada en Farmacia) y M. A. García D. (Ingeniero Agrónomo). Publicado por IPC Science and Technology Press para el International Institute for Environment and Development. Imprenta del Servicio de Publicaciones Agrarias, Madrid. 207 p.

MILTHORPE, f. I. and J. MOORBY. 1974. An Introduction to crop physiology. School of Biological Sciences, Macquarie University. Cambridge university Press. 202 p.

ODUM, E. P. 1986. Fundamentos de Ecología. Traducción R. E. Mata, Biólogo, Facultad de Ciencias UNAM. Nueva editorial Interamericana. México, D. F. 422 p.

SILVEIRA BERNARDES, M. 1987. Fotossíntese no dosel das plantas cultivadas. En: Castro, P. R. C., Ferreira, S. O. e Yamada, T., editores. Ecofisiologia da produção agrícola. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Instituto Agronômico. Campinas (SP). 13 – 48 p.

STERN, K. R. 1988. Intruductory Plant Biology. California State University, Chico. Wm. C. Brown Publishers. Dubuque, Iowa. Fourth edition. 498 p.

WEIER, T. E.; C. R. STOCKING y M. G. BARBOUR. 1983. Botánica. Versión española de la quinta edición en inglés: Botany an introduction to plant biology. Trad: A. Contin. Quinta ed. Editorial Limusa, México. 737 p.