

# LA VEGETACIÓN COMO SUMIDERO DE CO<sub>2</sub>

## BASES DEL PROCESO FOTOSINTÉTICO

El proceso fotosintético es muy complejo y ocurre en los cloroplastos, que son unos orgánulos localizados en el interior de las células de las hojas y partes verdes de los vegetales (Figura 1). En el proceso fotosintético los vegetales captan el CO<sub>2</sub> atmosférico y lo transforman en compuestos orgánicos según la ecuación general:



En el proceso fotosintético cabe distinguir varias fases:

- Fase fotoenergética, en la que la energía de la radiación luminosa es captada por los pigmentos fotosintéticos y utilizada en la formación de compuestos ricos en energía (ATP o Adenosin Trifosfato) y en capacidad reductora (NADPH o Nicotin-Adenin-Dinucleotido-Fosfato reducido).
- Fase de fijación inicial del CO<sub>2</sub>, en la que el anhídrido carbónico del aire se incorpora a unos determinados compuestos orgánicos de las plantas, formando compuestos ácidos de 3 o 4 átomos de carbono, según que se trate de plantas de tipo C-3, C-4 o CAM.
- Fase de reducción y síntesis en la que los compuestos ácidos de 3 átomos de carbono se reducen para formar azúcares (triosas) mediante el NADPH y el ATP formados en la fase fotoenergética. A las reacciones de la fase a) se les llama “reacciones luminosas” y a las de las fases b y c “reacciones oscuras” (Figura 2). Las “reacciones luminosas” ocu-

rrren en las membranas de los cloroplastos (tilacoides), mientras que las “reacciones oscuras” tienen lugar en el estroma del cloroplasto.

### FASE FOTOENERGÉTICA

La energía luminosa es captada por los pigmentos fotosintéticos (clorofilas y carotenoides), los cuales se encuentran dispuestos ordenadamente en las membranas lipoproteicas internas de los cloroplastos (tilacoides) formando unas unidades especiales denominadas “fotosistemas”, cada una de las cuales consta de varios centenares de moléculas (principalmente pigmentos). En cada tilacoide al recibir la luz se produce una serie de fenómenos análogos a los que se dan en las célu-

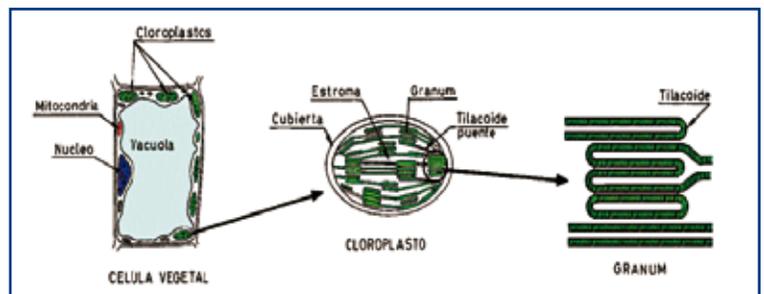


Figura 1. Estructura del aparato fotosintético de una célula vegetal, en una serie de sucesivas ampliaciones. En las membranas de los tilacoides se encuentran las moléculas responsables de la captación de la energía de las radiaciones luminosas y su transformación en energía química.

las fotoeléctricas artificiales, ya que el conjunto actúa como un semiconductor (Figura 3). Al incidir un fotón de radiación luminosa sobre un fotosistema, transfiere su energía a una de las moléculas de pigmento presente en dicho fotosistema la cual es transferida a su vez, a través de una serie de moléculas transportadoras hasta una molécula es-

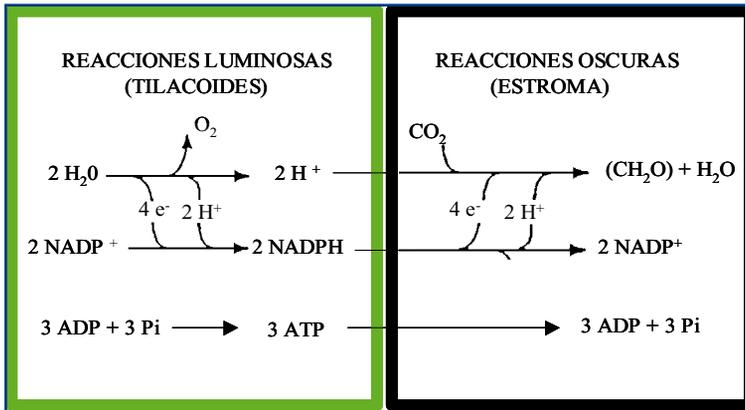


Figura 2. Representación esquemática del proceso fotosintético que ocurre en los cloroplastos, en la que se separan las reacciones luminosas que ocurren en los tilacoides y las reacciones oscuras que se dan en el estroma.

pecial de clorofila denominada “centro de reacción”, uno de cuyos electrones absorbe la energía y se excita de tal manera que llega a abandonar la molécula, creando en la membrana tilacoidea lo que en la teoría de semiconductores se denomina un par “hueco-electrón”. Este electrón energizado tiene suficiente energía para reducir al  $\text{CO}_2$  a través de una cadena de transportadores específica del

proceso fotosintético cuyo, coenzima final es el sistema NADP-NADPH (Nicotin-Adenin-Dinucleotido-Fosfato).

El déficit de electrones creado en los pigmentos de los fotosistemas es repuesto con electrones arrancados del agua del interior del tilacoide por medio de un compuesto fuertemente oxidante y otra cadena específica de moléculas transportadoras de electrones. Por efecto de las radiaciones luminosas sobre los fotosistemas, se produce un flujo de electrones desde el interior del tilacoide hasta el exterior, lo que crea una atmósfera electro-negativa en el exterior del tilacoide, y un exceso de carga positiva equivalente (protones) en el lado interno de la membrana tilacoidea, lo que crea una diferencia de potencial a ambos lados. Esto propicia la salida de protones al exterior, lo que produce energía que es

aprovechada para acumularla en forma de energía química mediante la producción de ATP (adenosin trifosfato) por fosforilación del ADP (adenosin difosfato).

La transferencia de electrones desde el agua hasta la reducción del carbono procedente de la fijación del  $\text{CO}_2$  se realiza por medio de dos fotosistemas (Figura 4) que actúan en cadena. Uno de éstos, el Fotosistema I, es el que comu-

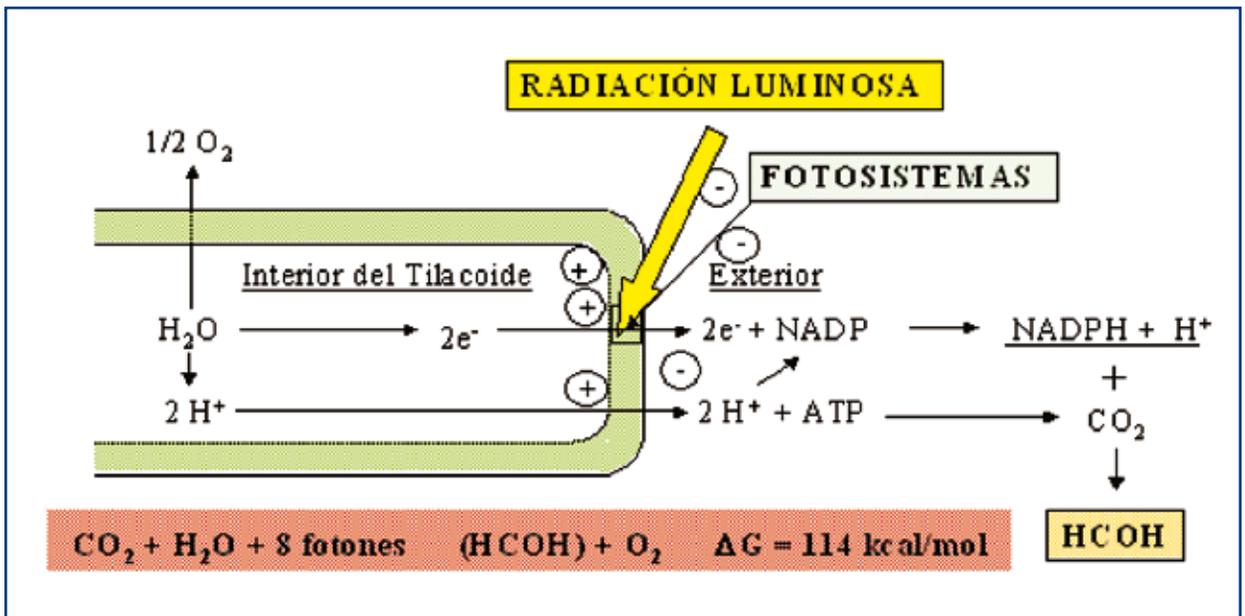


Figura 3. El funcionamiento fotosintético de un tilacoide iluminado es semejante a un semiconductor. Por efecto de las radiaciones luminosas sobre los fotosistemas se produce un flujo de electrones desde el agua del interior del tilacoide hasta el exterior, que reducen las moléculas de NADP (nicotin-adenin dinucleótido fosfato) para dar NADPH, que son las que van a reducir al  $\text{CO}_2$ . La salida de electrones del interior del tilacoide crea una diferencia de potencial a ambos lados de la membrana, lo que favorece la salida de protones que producen energía, la cual se aprovecha para la formación de ATP que se utiliza también en el proceso fotosintético.

nica a los electrones la energía necesaria para reducir al CO<sub>2</sub> y el otro, el Fotosistema II, es el que repone al Fotosistema I los electrones gastados, a partir de electrones producidos en la rotura de la molécula de agua. La energía de las radiaciones luminosas es empleada en elevar la energía potencial de los electrones desde el nivel que tienen en la molécula de agua (E<sub>o</sub> = + 0,8 V) hasta los niveles que tienen en los compuestos orgánicos (E<sub>o</sub> = - 0,43 V para el carbono reducido), ganando cada electrón un potencial energético de 1,23 voltios. La energía necesaria para elevar 1,23 V el potencial de un mol de electrones es equivalente a unas 30 kcal.

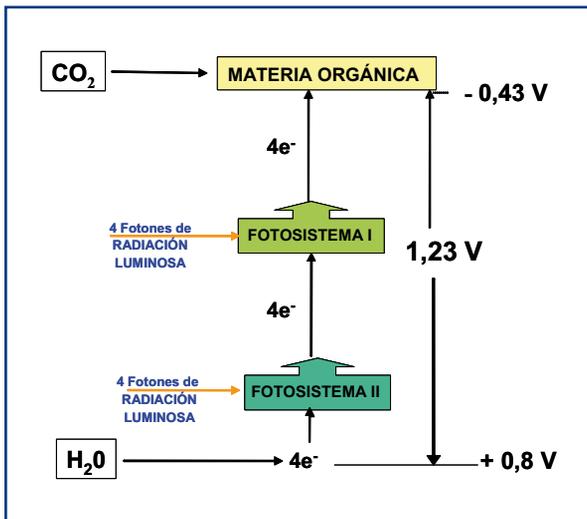


Figura 4. Esquema del transporte fotosintético de electrones desde el agua hasta la materia orgánica a través de dos fotosistemas (PS-I y PS-II), elevando su energía potencial desde el nivel que tienen en el agua (+ 0,8 voltios) hasta un nivel suficientemente alto como para transferirse a los compuestos que van a reducir al CO<sub>2</sub> (- 0,43 voltios).

### FASE DE FIJACIÓN INICIAL DEL CO<sub>2</sub> PLANTAS DE TIPO C-3, C-4 Y CAM

La fase inicial de fijación de CO<sub>2</sub> no requiere luz y se realiza por medio de enzimas carboxilásicas que incorporan el CO<sub>2</sub> a moléculas orgánicas específicas, produciendo inicialmente ácidos orgánicos. En el Reino Vegetal existen dos tipos de carboxilasas relacionadas con la fotosíntesis, con propiedades químicas muy diferentes que dan origen a variaciones fisiológicas considerables en las plantas que la poseen.

En algas y en la mayoría de las plantas superiores, la molécula aceptora del CO<sub>2</sub> es un azúcar de 5 átomos de carbono, la ribulosa-1,5,difosfato (RuDP), actuando la RuDP-carboxilasa como enzima catalizadora de este proceso. La incorporación de una molécula de CO<sub>2</sub> a la RuDP produce un compuesto inestable de 6 átomos

de carbono (beta-cetoácido) para escindir-se inmediatamente en dos moléculas de ácido fosfoglicérico (PGA) de 3 átomos de carbono (Figura 5). Este tipo de asimilación del CO<sub>2</sub> es el que se produce en las denominadas plantas C-3, ya que el primer producto formado tiene tres átomos de carbono.

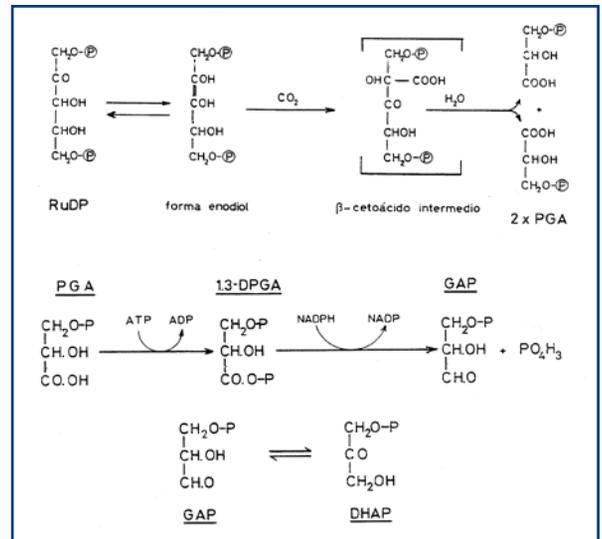


Figura 5. Esquema de la fase inicial de fijación del CO<sub>2</sub> en la fotosíntesis de las plantas de tipo C-3. RuDP: Ribulosa difosfato; PGA: ácido fosfoglicérico; GAP: aldehído fosfoglicérico; DHAP: fosfato de dihidroxicetona.

En las plantas denominadas C-4, a las que pertenecen la caña de azúcar, el maíz y el sorgo, entre otras, el CO<sub>2</sub> atmosférico se fija inicialmente a la molécula de ácido fosfoenolpirúvico (PEPA) actuando la PEP-carboxilasa como enzima catalizadora de este proceso. Inicialmente se forma ácido oxalacético, de 4 átomos de carbono, que luego se transforma en ácido málico o en aspártico. Posteriormente, estos compuestos se descarboxilan para ceder el CO<sub>2</sub> a las moléculas que intervienen en el “Ciclo de Calvin” siguiendo un proceso análogo al que se desarrolla en las plantas

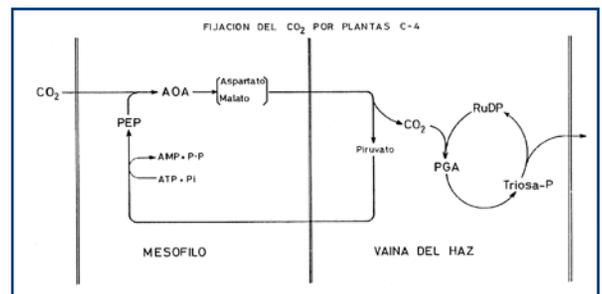


Figura 6. Esquema de la asimilación del CO<sub>2</sub> en las plantas de tipo C-4.

C-3 (Figura 6). La PEP-carboxilasa existe en el citoplasma, se activa con la luz, y es mucho más abundante en las plantas C-4 que en las C-3 (unas 60 veces).

Una de las diferencias existentes entre la PEP-carboxilasa y la RuDP-carboxilasa es la mayor afinidad que existe por el CO<sub>2</sub> por parte de la primera (unas 10 veces superior). Esto hace que las plantas C-4 puedan efectuar fotosíntesis en niveles muy bajos de concentración de CO<sub>2</sub> (incluso para valores de 1 ppm), y que no se produzcan pérdidas por respiración durante el día. En efecto, el CO<sub>2</sub> desprendido en los procesos respiratorios de las raíces y partes no fotosintéticas del vegetal, a su paso por el parénquima foliar es fijado por la PEP-carboxilasa, con lo que se impide su salida al exterior. De esta manera, el “punto de compensación” (concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico para la que la tasa de respiración y de fotosíntesis están compensadas) en las plantas C-4 puede ser del orden de 1 ppm. Este tipo de plantas resultan por tanto muy eficientes para la captación del CO<sub>2</sub> y por tanto suelen ser muy productivas (Figura 7).

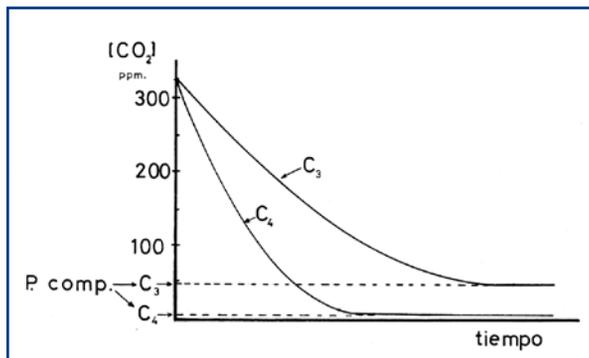


Figura 7. Variación de la concentración de CO<sub>2</sub> en un circuito cerrado durante la fotosíntesis de una planta de tipo C-3 o de tipo C-4, con indicación de los respectivos puntos de compensación (P. comp.).

En las plantas de tipo C-3, que poseen muy poca PEP-carboxilasa, el valor del punto de compensación está alrededor de las 50 ppm de CO<sub>2</sub>. En este tipo de plantas, además de la respiración mitocondrial que se produce en los órganos desprovistos de clorofila, existe un tipo especial de “respiración aparente” que se efectúa en los órganos verdes en condiciones de iluminación y baja concentración de CO<sub>2</sub> que recibe el nombre de fotorrespiración, aunque no produce energía ni tiene que ver con la respiración mitocondrial. Este proceso se origina por una propiedad específica de la enzima RuDP-carboxilasa (Figura 8), que en condiciones de fuerte iluminación, alta concentración de oxígeno y baja de CO<sub>2</sub>, fija oxígeno a la molécula de RuDP que se escinde en dos moléculas más pequeñas (ácido

fosfoglicólico y ácido fosfoglicérico), degradándose después una de ellas (el ácido P-glicólico) con producción de CO<sub>2</sub>, en un complicado proceso metabólico en el que intervienen tres tipos de orgánulos celulares (cloroplastos, peroxisomas y mitocondrias). Cuanto mas baja es la concentración de CO<sub>2</sub> en condiciones de alta iluminación, mayor es la fotorrespiración de las plantas C-3, lo que produce importantes pérdidas de compuestos orgánicos y disminuye notablemente la producción potencial de este tipo de plantas.

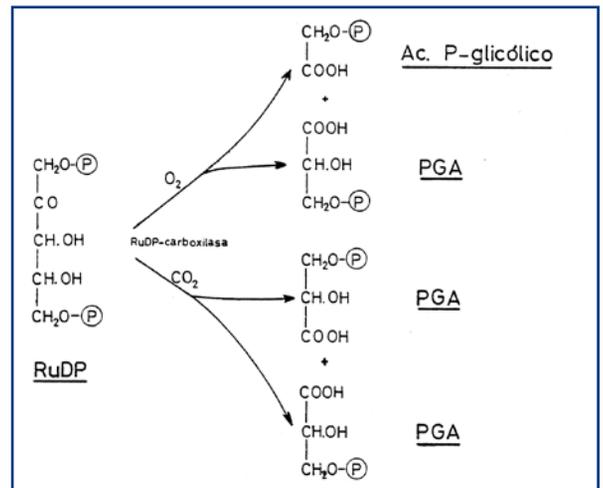


Figura 8. Esquema de las dos funciones de la enzima RuDP carboxilasa sobre la RuDP. Una de ellas incorpora una molécula de CO<sub>2</sub> y produce 2 moléculas de PGA (función carboxilásica), la otra, que actúa en presencia de oxígeno y bajo fuerte iluminación, produce la rotura de la molécula tras oxidarla produciendo ácido P-glicólico y PGA (función oxigenásica), fenómeno conocido como fotorrespiración. RuDP: ribulosa difosfato; PGA: ácido fosfoglicérico.

En las plantas de la Familia de las Crasuláceas, y otras especies de una docena de Familias botánicas (Cactáceas, Agaváceas y Euforbiáceas, entre otras) se da un tipo especial de fijación de CO<sub>2</sub> que se conoce como CAM (Crasulacean Acid Metabolism). Son plantas adaptadas a condiciones de sequedad extrema y para evitar la desecación de sus partes carnosas durante el día mantienen los estomas cerrados. La fijación del CO<sub>2</sub> la realizan durante la noche mediante la encima PEP-carboxilasa que lo fija al ácido PEP para formar ácido málico, el cual es acumulado en las vacuolas de las células hasta el final de la noche. Durante el día el ácido málico se decarboxila y el CO<sub>2</sub> producido no llega a salir al exterior, sino que es captado por la RuDP-carboxilasa de los cloroplastos del parénquima e incorporado a la RuDP para completar las reacciones del Ciclo de Calvin.

## ACTIVIDAD FOTOSINTÉTICA DE LA BIOSFERA

### EVOLUCIÓN HISTÓRICA

Los seres vivos han influido profundamente en la composición de la atmósfera terrestre principalmente por la actividad fotosintética de los vegetales. Si bien los primeros seres fotosintéticos datan de más de 3.000 millones de años, la fotosíntesis que debieron realizar era, con seguridad, de un tipo diferente a la realizada hoy por las algas y plantas superiores. Es muy probable que dichos seres tuvieran un solo fotosistema que funcionaría en forma cíclica, al igual que las bacterias fotosintéticas actuales,

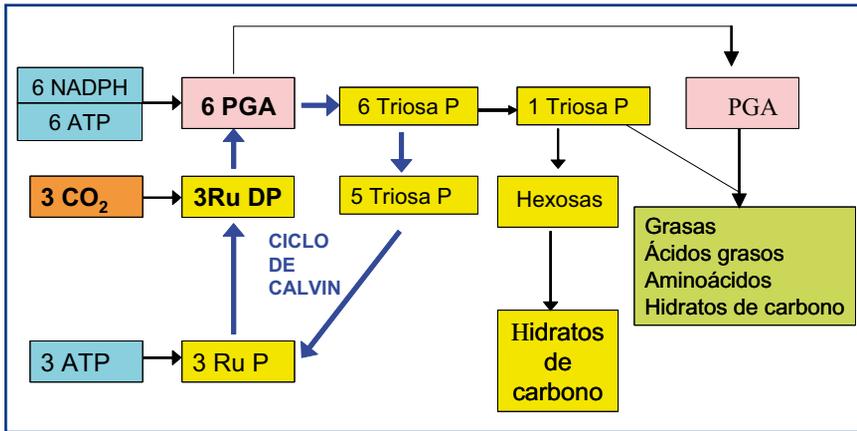


Figura 9. Esquema del Ciclo de Calvin con indicación de los compuestos que se derivan de él. En el Ciclo de Calvin, 3 moléculas de ribulosa-fosfato (RuP) se activan con 3 moléculas de adenosintrifosfato (ATP) para producir 3 moléculas de ribulosa difosfato (RuDP). Estas moléculas captan el CO<sub>2</sub> produciendo cada una de ellas 2 moléculas de ácido fosfoglicérico (PGA) y posteriormente son transformadas en azúcares (triosa-P) con intervención del coenzima NADPH (nicotin adenin dinucleótido fosfato) y ATP como dador de energía.

### FASE DE REDUCCIÓN DEL CARBONO Y SÍNTESIS DE AZÚCARES

En las plantas de tipo C-3, la reducción del carbono se realiza a partir del PGA mediante las reacciones implicadas en el "Ciclo de Calvin". Este ácido es reducido a azúcar (triosa) utilizando los compuestos reductores (NADPH) y energéticos (ATP) formados en los cloroplastos por medio de la luz (fase fotoenergética de la fotosíntesis). En la Figura 9 se indican los compuestos que intervienen en el "Ciclo de Calvin", las moléculas iniciales y las restantes moléculas orgánicas que derivan de él. En la figura 10 se indica de forma esquemática el origen de las principales moléculas que forman la biomasa.

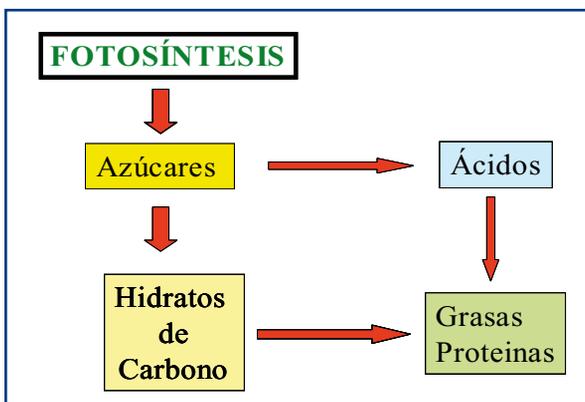


Figura 10. Esquema de la formación de los compuestos principales de la materia orgánica a partir de los azúcares originados en la fotosíntesis.

captando la energía de la radiación solar y transformándola en energía química (Figura 11), Esta energía se acumularía en "enlaces ricos en energía" (tal vez se utilizó ya el ATP para esta finalidad) para ser empleada mas tarde en los procesos de biosíntesis de los compuestos orgánicos. Estos seres primitivos eran incapaces de romper la molécula de agua para obtener electrones y por tanto no se producía oxígeno molecular ni fijaban CO<sub>2</sub>.

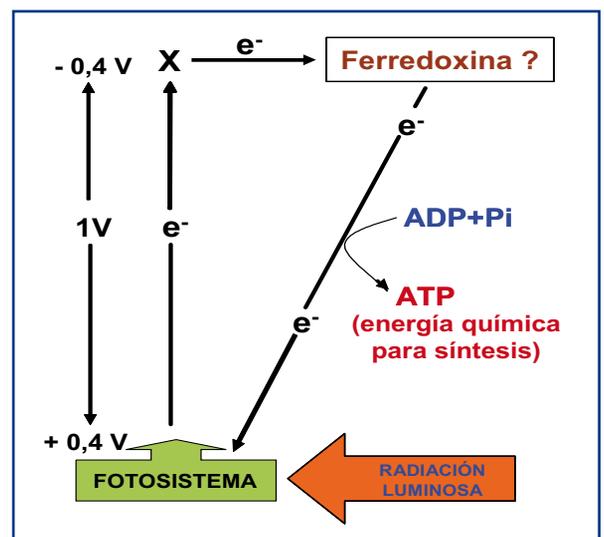


Figura 11. Esquema del funcionamiento fotosintético de algunas bacterias actuales (tipo Rhodospirillum), considerado como el tipo primitivo de fotosíntesis.

En un principio la atmósfera prácticamente no contenía oxígeno y esta situación se prolongó hasta la aparición de los seres fotosintéticos con cloroplastos provistos de dos fotosistemas (hace unos 1.000 millones de años), los cuales dieron origen a un aumento paulatino de su contenido en la atmósfera. En el período Cámbrico (hace unos 550 millones de años) había ya un 1 % de oxígeno en la atmósfera y al final del Devónico (unos 200 millones de años después) ya se alcanzaba el 10 %. Este incremento constante de la producción de oxígeno ha dado origen a la concentración actual del orden del 21 %. La aparición del oxígeno en la atmósfera posibilitó el desarrollo de seres aerobios que por medio de la respiración, eran capaces de oxidar totalmente la materia orgánica utilizando el oxígeno como aceptor final de electrones.

Paralelamente, la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera fue disminuyendo hasta llegar a concentraciones del orden de la actual. Una gran parte del carbono fijado por los seres fotosintéticos y que constituyó parte de sus organismos, hoy se encuentra inmovilizado en las rocas calizas, en los yacimientos de carbón, petróleo o gas natural y en pizarras bituminosas.

En las mediciones realizadas sobre la concentración de CO<sub>2</sub> en los testigos de hielo de la Antártida se ha podido ver que antes de la época industrial, la concentración de este gas en la atmósfera oscilaba entre mínimos de 190 y 200 ppmv y máximos de 268 a 280 valor éste último que tenía la atmósfera en la era pre-industrial. La evolución de esta concentración como consecuencia de la actividad humana en la época industrial ha ido evolucionando desde las 290 ppmv hasta las 380 ppmv en que se encuentra en la actualidad (750 Gt de C, o lo que es lo mismo 2.750 Gt de CO<sub>2</sub>).

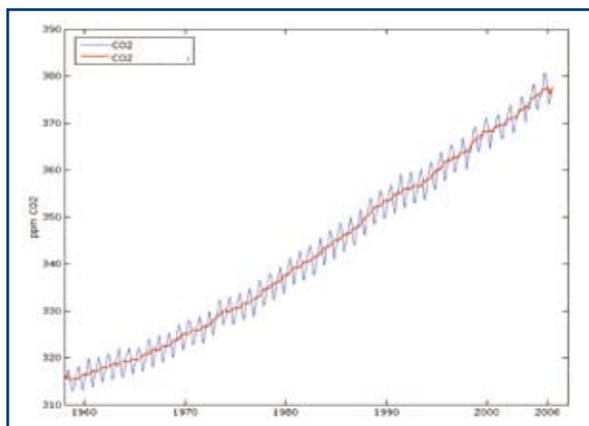


Figura 12. Variación de la concentración del CO<sub>2</sub> en la atmósfera en los últimos 50 años según el registro gráfico del observatorio del Mauna Loa (Islas Hawai). Los descensos anuales corresponden a periodos de verano del Hemisferio Norte y son debidos a la actividad fotosintética de la Biosfera.

La influencia de la fijación fotosintética de CO<sub>2</sub> en la Biosfera se puede seguir en los registros gráficos de la evolución de este gas que se han realizado en los últimos 50 años (desde 1957) en el observatorio de Mauna Loa en las Islas Hawai. Se aprecia una ascensión continua de tipo desde las 315 ppmv hasta el valor actual (alrededor de las 380 ppmv) con variaciones anuales de una amplitud de unas 5 ppmv (36 Gt de CO<sub>2</sub>) dando una curva creciente con marcados dientes de sierra anuales (Figura 12). Los mínimos de cada diente de sierra corresponden a periodos de verano del Hemisferio Norte, debido precisamente a la acción de la vegetación de este hemisferio, que ocupa una superficie muy superior a la del Hemisferio Sur y el incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> en el invierno boreal se explica por el incremento en el consumo de combustibles para calefacción y principalmente por la reducción notable de la actividad fotosintética global de la Biosfera.

### PRODUCCIÓN PRIMARIA DE LOS ECOSISTEMAS DE LA BIOSFERA

Los vegetales de los distintos ecosistemas a través de la fotosíntesis utilizan CO<sub>2</sub> atmosférico y l agua para formar su biomasa. Según la ecuación básica de la fotosíntesis por cada kg de azúcar producido se consumen 600 g de agua, se retiran de la atmósfera 1,47 kg de CO<sub>2</sub> y se producen 1,07 kg de oxígeno molecular.

La cantidad total de biomasa producida inicialmente se conoce como “producción primaria bruta” (PPB), pero

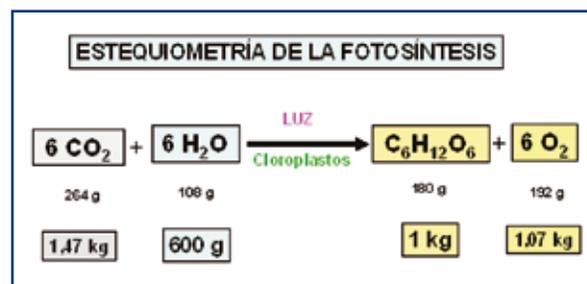


Figura 13. Variación de la concentración del CO<sub>2</sub>.

parte de la biomasa producida se gasta en los procesos respiratorios de la propia planta, principalmente para la obtención de energía que emplea en sus procesos metabólicos. Por este motivo la producción primaria neta (PPN) es sensiblemente inferior a la producción bruta, oscilando las pérdidas por respiración entre el 40 y el 75 % de la PPB, según la especie y las condiciones climáticas.

La cantidad de biomasa neta que producen anualmente los distintos ecosistemas de la Biosfera es muy variable según puede observarse en la Tabla 1. Los eco-

ECOSISTEMAS	SUPERFICIE 10 <sup>8</sup> ha (%)	Biomasa existente		Productividad anual	
		Media t/ha	Total 10 <sup>9</sup> t	Media t/ha	Total 10 <sup>9</sup> t
OCÉANOS	361 (70,8)	0,1	4	1,5	55,0
BOSQUES	57 (11,2)	298,2	1.700	14,0	79,9
PRADOS Y ESTEPAS	24 (4,7)	30,8	74	7,9	18,9
CULTIVOS GRÍCOLAS	14 (2,7)	10,0	14	6,5	9,1
DESIERTOS Y TUNDRAS	50 (9,8)	3,7	18,5	0,6	2,8
AGUAS CONTINENTALES	4 (0,8)	75,0	30	11,3	4,5
<b>TOTAL</b>	<b>510 (100)</b>	<b>36,1</b>	<b>1.840,5</b>	<b>3,34</b>	<b>170,2</b>

Tabla 1. Estimación de la productividad media y de la biomasa existente en los diferentes macroecosistemas de la Biosfera. Valores referidos a materia seca. Fuente: Adaptado de Wittaker (\*).

sistemas más productivos son los bosque, con una producción media anual de 14 t/ha de materia seca, pero con una amplia variación en los valores medios entre los bosques tropicales (22 t/ha de m.s.) y los bosques boreales (8 t/ha de m.s.). Los bosques también son los ecosistemas que contienen la mayor cantidad de biomasa, aunque representan tan solo el 11,2 % de la superficie global y contribuyen a la producción global de las tierras emergidas en un 69,4 %. La tasa de acumulación de materia orgánica en los bosques equivalente a más de 20 veces su producción anual, lo que les convierte en excelentes sumideros de carbono.

Los océanos por el contrario, tienen una productividad media anual relativamente baja (1,5 t/ha de m.s.), con una tasa de acumulación de 0,066 lo que quiere decir que la biomasa marina se renueva anualmente más de 15 veces en su conjunto. Por este motivo tienen muy poco interés para ser considerados como sumidero de carbono en base a su biota.

Los cultivos agrícolas, con una productividad media anual de 6,5 t/ha de materia seca global (raíces y parte aérea), tienen menor productividad que los bosques (menos de la mitad), a pesar de los insumos que reciben en forma de labores, fertilizantes y plaguicidas, lo que indica que las especies que componen los cultivos tradicionales no se han seleccionado precisamente por su producción de biomasa global.

De todos los ecosistemas de la Biosfera, los que ofrecen mejor perspectivas para actuar como sumideros de carbono son los bosques, debido a su elevada productividad y a su capacidad de acumular una abundante cantidad de carbono en su biomasa (casi el 50 % de su materia seca). Dentro del conjunto de ecosistemas que conocemos como “bosques”, constituidos por especies leñosas cuyo ciclo de vida es de varias decenas o centenares de años, la productividad y la capacidad de almacenamiento de biomasa es muy variable, como se puede ver en la Tabla 2.

ECOSISTEMA FORESTAL	SUPERFICIE 10 <sup>6</sup> ha (%)	Biomasa (B) t ms/ha	PPN t ms/ha. año	B/PPN
Bosque tropical lluvioso (plusvalía)	1.700	450	22	20,5
Bosque tropical estacional	750	350	16	21,9
Bosque templado perennifolio	500	350	13	26,9
Bosque templado caducifolio	700	300	12	25,0
Bosque boreal	1.200	200	8	25,0
Matorrales y montebajo	850	60	7	8,5

Tabla 2. Estimación de la productividad media y de la biomasa existente en los diferentes ecosistemas forestales de la Biosfera. Valores referidos a materia seca. PPN: producción primaria neta anual; B: biomasa total; t ms: toneladas de materia seca Fuente: Adaptado de Wittaker (\*).

En esta tabla se indica la productividad primaria neta (PPN) media, expresada en t de materia seca por ha y año, la biomasa existente (B) expresada en t de materia seca por ha y la relación B / PPN que indica la tasa de renovación de la biomasa expresada en años, o lo que es lo mismo, los años de producción que serían necesarios para acumular la biomasa existente, suponiendo que no hubiera pérdidas.

## LA FIJACIÓN DE CARBONO

### POR LOS ECOSISTEMAS NATURALES

Asumiendo que el contenido medio de carbono en la biomasa es de un 47,5 % (sobre base seca) se puede establecer que la cantidad de carbono fijado anualmente en toda la Biosfera es del orden de 80,8 Gt (1Gt = 1000 millones de toneladas), estimándose el contenido total de carbono inmovilizado en la biomasa de los seres vivos en 874.3 Gt, la mayor parte en los bosques (92,4 %), según se puede ver en la Tabla 3.

Asumiendo que cada tonelada de hidrato de carbono producido supone la fijación de 1,47 t de CO<sub>2</sub>, y asimilando la producción de materia seca con la de los carbohidratos, se puede establecer una estimación de la fijación anual de CO<sub>2</sub> por los distintos ecosistemas terrestres según se refleja en la Tabla 4.

Ecosistema	Superficie 106 km <sup>2</sup>	Carbono inmovilizado Gt	Carbono fijado anualmente Gt
Oceanos	361	1,9	26,1
Bosques	57	807,5	38,0
Prados y estepas	24	35,2	9,2
Cultivos agrícolas	14	6,6	4,3
Desiertos y tundras	50	8,8	1,3
Aguas continentales	4	14,3	2,1
TOTAL	510	874,3	80,8

Tabla 3. Fijación anual de Carbono en la Biosfera y estimación del carbono inmovilizado en la biomasa de los Macroecosistemas que la componen. Valores en Gt de carbono (1Gt=109 t), deducidos considerando un contenido en C de la biomasa del 47.5% sobre base seca.

Ecosistema	Productividad Biomasa tm.s/ha.año	Carbono (C) fijado t de C/ha.año	CO <sub>2</sub> fijado t de CO <sub>2</sub> / ha.año
Bosque tropical lluvioso (pluvisilva)	22	10,45	32,34
Bosque tropical estacional	16	7,60	23,52
Bosque templado perennifolio	13	6,17	19,11
Bosque templado caducifolio	12	5,70	17,64
Bosque Boreal	8	3,80	11,76
Matorrales y monte bajo	7	3,32	10,29
Prados naturales	6	2,85	8,82
Cultivos herbáceos:			
- Secano	6	2,85	8,82
- Regadío: Alta producción	25	11,87	36,75

Tabla 4. Productividad media anual estimada de diversos ecosistemas. Valores expresados en toneladas de m.s. producida ó en toneladas de CO<sub>2</sub> fijado. Comprende toda la biomasa, incluidas las raíces.

## INFLUENCIA DEL INCREMENTO DEL CO<sub>2</sub> ATMOSFÉRICO SOBRE LA FIJACIÓN DE ÉSTE POR LA VEGETACIÓN

En el estado actual de los conocimientos es muy difícil predecir a nivel global la evolución cuantitativa que seguirá el desarrollo de la vegetación en función del incremento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Por un lado, las condiciones de aumento del CO<sub>2</sub> disponible y de una mayor temperatura media, parecen apuntar hacia un aumento en la capacidad de fijación fotosintética de la biosfera en su conjunto, aunque esto dependerá mucho de la disponibilidad de agua por las plantas. La distribución de las precipitaciones como consecuencia del posible cambio climático que se origine, puede ser determinante para dar una respuesta fiable a esta cuestión. De todas formas

parece haber unanimidad en la consideración de que a nivel global aumentará la capacidad fotosintética de la Biosfera y como consecuencia aumentará también la inmovilización de carbono en la biomasa de los seres vivos. De acuerdo con C. Goudrian (1) este efecto sería una continuación del que se ha venido produciendo desde el último máximo glaciario (hace unos 20.000 años) hasta el inicio de la era industrial por un efecto combinado del aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico (de 200 a 280 ppm) y de la temperatura, habiéndose incrementado en más del doble el carbono fijado en la biomasa de la biosfera durante este período.

Por otro lado, en la actualidad, el incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> que se observa en la atmósfera, es inferior en más de un 50% al esperado, teniendo en cuenta la cantidad total emitida por causas antropogénicas, lo que indica un aumento de fijación de carbono por la vegetación, ya que este aumento no puede explicarse solamente por la simple absorción de los océanos.

La vegetación por lo tanto ejerce un cierto control del efecto invernadero mediante la absorción de una parte del incremento de CO<sub>2</sub> producido, por lo que todas las disposiciones tendientes a favorecer el desarrollo de la vegetación o frenar su eliminación, son contribuciones positivas para reducir el incremento del efecto invernadero y sus consecuencias.

## LAS MASAS FORESTALES COMO SUMIDERO DE CO<sub>2</sub>

La roturación de tierras forestales con fines agrícolas ha sido una constante en el desarrollo de la Agricultura desde sus inicios y puede decirse que hoy día, una cantidad importante de los incendios que destruyen los bosques tropicales y subtropicales están motivados por indígenas que practican una agricultura de subsistencia consistente en la quema de la selva para plantar semillas en la superficie deforestada, aprovechando el poder fertilizante de las cenizas de la biomasa quemada. Esta práctica es una de las causas de la desertización, ya que al eliminarse la cubierta vegetal, las lluvias producen una intensa erosión en el suelo, que es arrastrado por las aguas de escorrentía, quedando desprovisto de la capa de tierra vegetal y empobrecido para el crecimiento futuro de la vegetación.

La agricultura de los países desarrollados se efectúa también sobre terrenos que en su día estuvieron ocupados por masas forestales, en los que, gracias a la evolución de las técnicas de producción agrícola y conservación del suelo, se ha logrado un incremento espectacular de la producción de alimentos. Este hecho ha motivado que los países desarrollados produzcan más alimentos

de los que son capaces de consumir o exportar, llegando a producir en ellos serios problemas económicos para subvencionar esta producción excedentaria. Por este motivo existe en la actualidad una gran cantidad de superficie agrícola que no tiene una utilidad directa para la producción de alimentos y que podría ser destinada a otros usos, entre los que destaca la recuperación del carácter forestal inicial.

Potenciar el crecimiento de masas forestales es una de las formas más claras de lucha directa contra el incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera ya que los árboles son capaces de retirar de la atmósfera grandes cantidades de este gas e inmovilizar el carbono en su biomasa lignocelulósica. Según se dijo anteriormente, los bosques contienen en la actualidad unas 807,5 Gt de carbono inmovilizado en su biomasa, lo que supera con creces al contenido de carbono en la atmósfera (750 Gt). Estas cifras indican por sí mismas el enorme potencial de estos ecosistemas para el control del incremento del efecto invernadero.

Dado que la circulación del CO<sub>2</sub> atmosférico no conoce fronteras, las medidas anteriormente indicadas podrían aplicarse a cualquier país que disponga de superficies para ello, principalmente los países mediterráneos de la UE y países en vías de desarrollo, con lo que se podrían alcanzar otra serie de objetivos de tipo social que beneficiarían directamente a dichos países e indirectamente a todos los demás. La posibilidad de financiar plantaciones forestales en países distintos del de la industria productora de CO<sub>2</sub> podría hacer el proceso viable desde un punto de vista práctico, ya que no existiría el condicionante de la disponibilidad de tierras en el propio país, y también desde el punto de vista económico ya que se podrían elegir países en los que los costes de realización de la plantación fueran más favorables.

Considerando una producción media de 1 tonelada de CO<sub>2</sub> por cada MWh producido con carbón o 0,35 t/MWh si la producción se realiza mediante ciclo combinado, y asumiendo una fijación media anual de CO<sub>2</sub> del orden de 19,11 t/ha para un bosque templado perennifolio, si se quisiera neutralizar el CO<sub>2</sub> producido por una industria que utilizara carbón, cada hectárea de bosque podría absorber anualmente el CO<sub>2</sub> producido por la generación de 19,11 MWh con carbón o 54,6 MWh producidos mediante ciclo combinado. Suponiendo plantas de 500 MW que trabajen una media de 7.500 horas anuales (3,5 x 10<sup>6</sup> MWh), la superficie forestal necesaria para neutralizar todo el CO<sub>2</sub> producido por la generación de electricidad con carbón sería de 196.232 ha mientras que en el caso del ciclo combinado sería de 68.681 ha. Desde un punto de vista gráfico, la primera superficie sería equivalente a un círculo de 25 km de radio y en el segundo de 15 km aproximadamente (Figura 13).

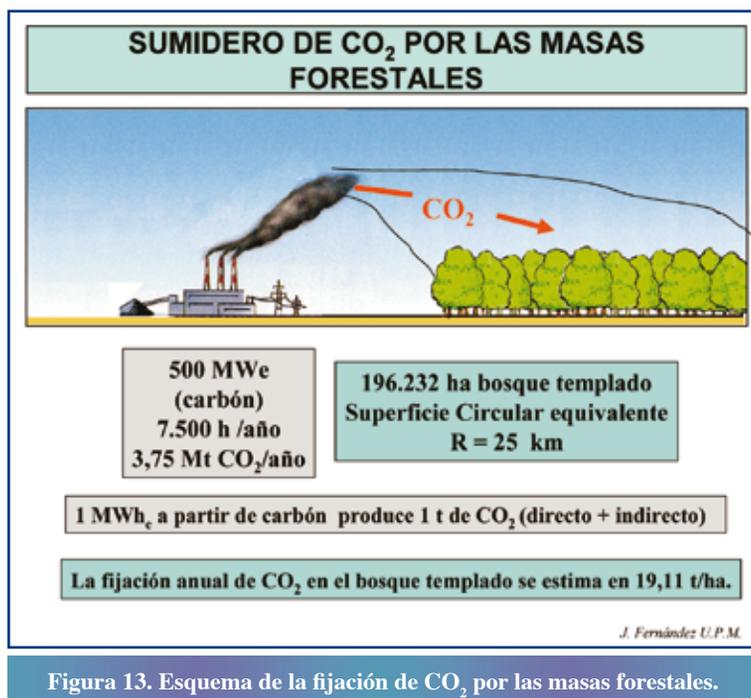


Figura 13. Esquema de la fijación de CO<sub>2</sub> por las masas forestales.

Sobre la disponibilidad de tierra para realizar este tipo de actuaciones, podemos decir que en el momento actual hay una gran cantidad de tierra que se ha dejado de cultivar como consecuencia de la aplicación de la PAC en los países mediterráneos de la UE. Concretamente en España, en los últimos 25 años se han dejado de cultivar más de 3 millones de hectáreas de tierras de agricultura tradicional de secano (Tabla 5) que en su conjunto servirían para neutralizar el CO<sub>2</sub> producido por 163.800 GWh de centrales de ciclo combinado (más del doble del producido en el año 2005 -78.885 GWh) o 57.330 GWh producidos con carbón (En 2005 se produjeron con carbón 80.517 GWh). Además de las tierras agrícolas abandonadas de la producción de alimentos en los países mediterráneos de la UE, existe una gran disponibilidad de tierras en países en vías de desarrollo en los que las inversiones en reforestación servirían para aumentar su nivel de vida, favorecer su desarrollo, creación de empleos, retener la emigración y todo un sinfín de ventajas medioambientales al crear ecosistemas naturales que aumentarían la pro-

ducción de oxígeno en la biosfera. Además todo ello se podría lograr con una tecnología sencilla, disponible en la actualidad y apropiada para los países en desarrollo.

## COMENTARIO FINAL

La forestación de superficies agrícolas no utilizadas para fines alimentarios podría ser una solución efectiva para contrarrestar las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por la generación de energía con combustibles fósiles y podría servir para fomentar el desarrollo agrario tanto en los países del sur de la UE como en países en vías de desarrollo de todo el mundo. Las inversiones en este sector podrían proporcionar una gran cantidad de trabajo que ayudaría a frenar la emigración a zonas industriales y favorecería el desarrollo de pequeñas y medianas empresas del ámbito agroforestal. Esta solución debería ser apoyada apropiadamente,

como una solución simbiótica entre la potencialidad natural agroforestal, y la solvencia económica del sector energético.

AÑO	SECANO	REGADÍO	TOTAL
1980	17.676,9	2.822,3	20.499,2
1990	16.973,4	3.199,0	20.172,4
2000	14.896,5	3.407,0	18.304,2
2006	14.191,9	3.214,2	17.407,0
Variación	8.485,0	+ 391,9	- 3.092,2

Tabla 5. Variación de la superficie agrícola en España en el período 1.980 – 2006 (-15 %). Valores en miles de ha.