

Fotosíntesis

Las plantas son seres vivos que tienen la capacidad de generar energía utilizando agua, luz solar y dióxido de carbono (CO₂) mediante reacciones fotoquímicas y bioquímicas; este proceso se conoce como fotosíntesis y en ella se producen compuestos orgánicos necesarios para la planta y se libera oxígeno (O₂) a la atmósfera como subproducto. La fotosíntesis es un proceso complejo que tiene una fase luminosa y una fase oscura. En la primera la energía luminosa es transformada en energía química (ATP y NADPH), mientras que en la fase oscura consiste en la síntesis de glucosa mediante la fijación de CO₂ en combinación con la energía química generada en la primera fase.



Figura 1. La fotosíntesis es un proceso complejo donde las plantas producen compuestos orgánicos necesarios para su desarrollo.

Fuente: Intagri

Para la fase oscura de la fotosíntesis, es importante entender que debido a las diferentes condiciones ambientales, las plantas han evolucionado y desarrollado adaptaciones metabólicas y anatómicas para hacer un [uso eficiente del agua \(EUA\)](#) y optimizar la velocidad de asimilación de CO₂ para mejorar la síntesis de carbohidratos (eficiencia fotosintética). Existen tres tipos de plantas de acuerdo con los mecanismos de asimilación del CO₂ en la fotosíntesis, donde el grupo más antiguo es el de plantas de metabolismo fotosintético C₃, seguida de las plantas C₄ y, finalmente las plantas CAM.

Plantas C₃

Los vegetales con ruta metabólica C₃ representan alrededor del 89 % de las plantas vasculares del planeta y la mayoría de los cultivos tienen este tipo de mecanismo. Algunos ejemplos de cultivos con mecanismo C₃ son: [arroz](#), [trigo](#), cebada, [soya](#), [pimiento](#) y [tomate](#).



Figura 2. Ejemplos de plantas C₃: papa, trigo y tomate.

Fuente: Intagri

Reciben el nombre de plantas C_3 debido a que durante la segunda etapa del proceso de la fotosíntesis, en las reacciones de carboxilación del ciclo de Calvin, el primer compuesto formado es el ácido fosfoglicérico (3-PGA), que está formado por 3 carbonos, producto de la combinación entre la ribulosa difosfato (5C) con el CO_2 . La enzima responsable de esta reacción es la ribulosa-bifosfato, mejor conocido como Rubisco. Aunque la principal función de esta enzima es fungir como catalizador para la carboxilación, también puede actuar como oxigenasa; esto significa que en presencia de luz, el oxígeno compite con el dióxido de carbono por los sitios activos de la enzima, provocando una pérdida de CO_2 (fotorespiración), lo cual reduce la capacidad fotosintética de la planta.

La fotorespiración es un fenómeno relacionado con el cierre estomático parcial o total de la planta y es un proceso que impacta en la productividad de los cultivos debido a que la enzima que fija el carbono en el ciclo de Calvin (Rubisco), fija O_2 en lugar del CO_2 , lo que significa un desperdicio de energía (ATP). La fotorespiración se ve favorecida cuando la planta está sometida a [estrés por alta temperatura](#), estrés hídrico o [estrés salino](#).

Plantas C_4

La ruta metabólica C_4 forma parte de la evolución de las plantas para evitar la fotorespiración. Esta ruta metabólica es una adaptación de las plantas para tener una [eficiencia en el uso del agua](#) mayor que las plantas C_3 . Aunque el porcentaje de plantas C_4 es menor, algunos cultivos de importancia económica tienen este tipo de metabolismo, por ejemplo: [maíz](#), [caña de azúcar](#), [sorgo](#) y amaranto.



Figura 3. Ejemplos de plantas C_4 : maíz, caña de azúcar y sorgo.

Fuente: Intagri.

Reciben el nombre de plantas C_4 ya que el primer compuesto formado en el proceso es el ácido oxaloacético (compuesto de 4 carbonos producto de la combinación entre el fosfoenol-piruvato (PEP) con el CO_2) que rápidamente es convertido a otro compuesto llamado malato. La enzima responsable de la reacción de carboxilación es la fosfoenol-piruvato carboxilasa (PEPc).

En este sentido, la particularidad de las plantas C_4 como resultado de su evolución es que el CO_2 de la atmósfera es capturado y fijado en dos compartimentos diferentes. Primero el CO_2 es capturado dentro de células especializadas llamadas mesofílicas, donde es fijado como HCO_3^- por la anhidrasa carbónica (AC) para ser tomada a continuación por la enzima PEPc que incorpora el carbono en un ácido C_4 . Posteriormente este ácido C_4 es transportado hacia la vaina del haz vascular por la acción de acarreadores específicos ATP dependientes, dando lugar a la descomposición (descarboxilación) de los ácidos C_4 generando una alta concentración de CO_2 en las células de la vaina e inhibiendo de esta manera la fotorrespiración. Cabe destacar que la descarboxilación según la especie es llevado por alguna de las siguientes enzimas: Málico-NADP, Málico-NAD o PEP Carboxiquinasa. Finalmente el CO_2 es fijado por la enzima Rubisco e incorporado al ciclo de Calvin-Benson. Esta adaptación en las plantas C_4 para transportar de forma efectiva el CO_2 consume energía (2 ATP) por molécula de CO_2 transportada; sin embargo, estas plantas compensan este gasto energético mayor con una mejor **eficiencia en el uso del agua**, mayor crecimiento y eficiencia en la fotosíntesis a altas temperaturas. Por otra parte, es importante mencionar que esta adaptación está encaminada al uso eficiente del agua, pero no a la tolerancia al estrés hídrico.

Plantas CAM

A diferencia de las otros dos tipos, las plantas CAM además de inhibir la fotorrespiración, sus adaptaciones evolucionaron para tolerar el estrés hídrico severo, ya que se caracterizan por la succulencia de tejidos o succulencia celular, disminución drástica de órganos fotosintéticos, cierre estomático diurno que evita la pérdida de agua, presencia de sistemas radicales extensivos, etc. Aproximadamente el 7 % de las plantas vasculares tienen la ruta metabólica CAM, donde destacan plantas que habitan en zonas cálidas y secas como los desiertos, seguido de especies epífitas de zonas tropicales y subtropicales, así como plantas acuáticas.



Figura 4. Ejemplos de plantas CAM: piña, pitahaya y orquídeas.

Fuente: Intagri.

Reciben el nombre de plantas CAM porque utilizan la vía del metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM, por las siglas del nombre en inglés), y se caracterizan por que tiene una fase de día y una fase de noche para el metabolismo del CO_2 .

- *Por la noche:* se forma en las células fotosintéticas el receptor primario del CO_2 , fosfoenol-piruvato (PEP). Después las plantas abren sus estomas para que el CO_2 del ambiente sea fijado por la enzima PEP carboxilasa (PEPC) en el citosol y se da lugar a la síntesis del ácido málico. Posteriormente el ácido málico (como ión malato) es almacenado en la vacuola central de las células fotosintéticas.

- *Durante el día:* Las plantas CAM no abren sus estomas, pero al interior de las células se da la liberación del malato de la vacuola hacia el citosol, inmediatamente se da paso a la descomposición (descarboxilación) del malato en el citosol para liberar el CO₂ y permitir la formación de compuestos de tres carbonos (piruvato o PEP) y finalmente el CO₂ entra al ciclo de Calvin.

Los estomas de las plantas CAM permanecen abiertos durante la noche y cerrados en el día para evitar pérdidas de agua por transpiración y reducir la fotorespiración manteniendo el nivel de CO₂ en el interior de la planta; son adaptaciones principalmente a condiciones ambientales desérticas por lo cual son alrededor de 5 veces más eficientes en el uso de agua. Sin embargo, las plantas CAM se comportan como plantas C₃ si el suministro de agua y las condiciones ambientales son adecuados. Dos ejemplos típicos son la piña (*Ananas comosus*) y el nopal (*Opuntia ficus-indica*), los cuales son cultivos altamente productivos en las regiones donde actualmente se cultivan.

En la figura 5, se puede observar un esquema donde se representan los diferentes mecanismos de las fotosíntesis de las plantas C₃, C₄ y CAM.

Como se mencionó en párrafos anteriores, cada tipo de planta está adaptada a ciertas condiciones ambientales. Además, la mayoría de los cultivos de importancia económica son plantas C₃, y en menor medida C₄, mientras que cultivos con mecanismo CAM solamente destaca la piña, nopal, pitahaya y las orquídeas.

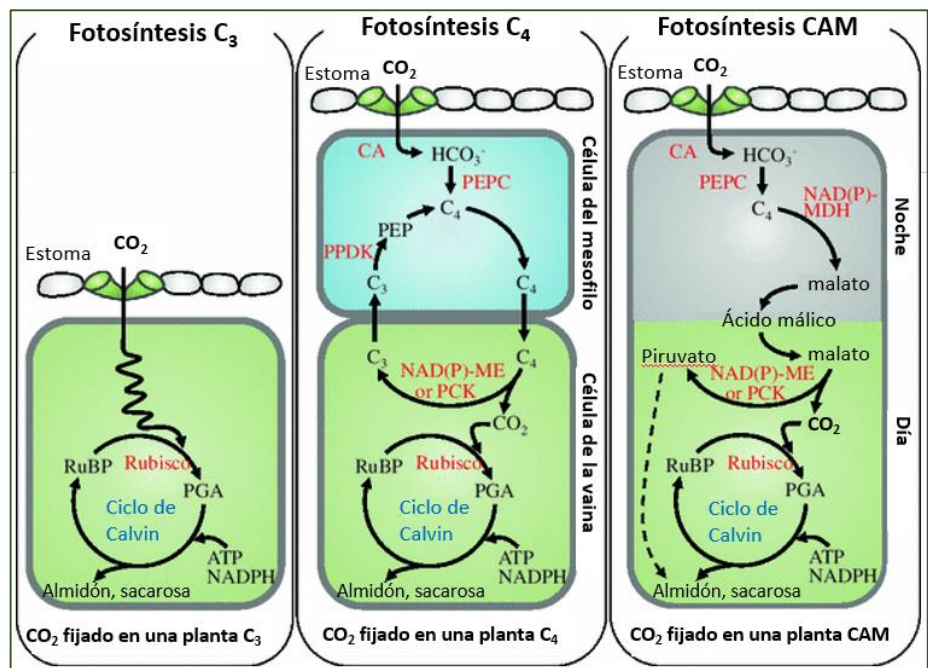


Figura 5. Las diferencias entre los tipos de plantas es la manera en que asimilan el CO₂ para realizar la fotosíntesis.
 Fuente: Adaptado por Intagri de Yamori *et al.*, 2014.

Alrededor del 85 al 90 % de la materia seca acumulada en un cultivo se deriva de la fotosíntesis. En este sentido, es importante tener un cultivo sano, con una [nutrición mineral balanceada](#) y un suministro óptimo y continuo de agua. Además, se debe tomar acciones para minimizar cualquier tipo de estrés hídrico, [estrés por altas o bajas temperaturas](#), [estrés por salinidad](#), etc., debido a que estas condiciones perjudican la capacidad de la planta para fijar CO₂ y llevar a cabo el proceso de la fotosíntesis.

Un claro ejemplo de que controlando los factores climáticos (temperatura, [radiación](#), humedad relativa, [concentración de CO₂](#), entre otros), tener una nutrición adecuada y control del [riego](#), así como un [manejo de las plagas y enfermedades](#), son los cultivos establecidos bajo ambientes protegidos; donde se realiza una producción intensiva, principalmente en hortalizas, y los rendimientos son altos.

Cita correcta de este artículo

INTAGRI. 2018. Plantas C₃, C₄ y CAM. Serie Nutrición Vegetal, Núm. 125. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 5 p.

Fuentes consultadas

- Almeraya, V. E. V.; Sánchez, Q. E. 2015. Adaptaciones fotosintéticas en las plantas para mejorar la captación del carbono. Revista Ciencia, 72-79.
- Andrade, J. L.; Barrera, E.; Reyes, G. C.; Ricalde, M. F.; Vargas, S. G.; Cervera, J. C. 2007. El metabolismo ácido de las crasuláceas: diversidad, fisiología ambiental y productividad. Boletín de la Sociedad Botánica de México, 81:37-50.
- Fontúrbel, R. F. E.; Achá, C. D.; Mondaca, G. D. A. 2007. Manual de Introducción a la Botánica. 2da Edición. Publicaciones Integrales de Bolivia. La Paz, Bolivia. 79-82 p.
- Mota, C.; Alcaraz, L. C.; Iglesias, M.; Martínez, B.; Carvajal, M. Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos. CEBAS-Consejo Superior de Investigaciones Científicas. España.
- Raya, P. J. C.; Aguirre, M. C. L. 2008. Aparición y evolución de la fotosíntesis C₄. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 14 (1): 45-50.
- Urrua, C. E. P. 2009. Fotosíntesis: aspectos básicos. Serie Fisiología Vegetal, 2(3): 1-47.
- Villalobos, M. F. J.; Fereres, C. E. 2017. Fitotecnia: Principios de agronomía para una agricultura sostenible. Ed. Mundi-Prensa. España. 628 p.
- Yamori, W.; Hikosaka, K.; Way, D.A. 2014. Temperature response of photosynthesis in C₃, C₄, and CAM Plants: temperature acclimation and temperature adaptation. Photosynthesis Research, 119: 101-117.