

AGROVOLTAICA Y PIRÓLISIS SOLAR: SINERGIAS PARA LA CIRCULARIDAD EN EL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS

DOI: 10.59730/rer.v12n56a1

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
QUÍMICA Y METALURGIA,
UNIVERSIDAD DE SONORA**
Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n,
Hermosillo, Sonora, 83000, México

Aurora Margarita Pat Espadas
aurora.pat@unison.mx

Víctor Manuel Maytorena Soria
victor.maytorena@unison.mx

Palabras clave:

pirólisis solar, energía eléctrica, agrovoltaica, energía solar, biochar, alimentos, agua, sostenibilidad

LA SOSTENIBILIDAD EN LA AGRICULTURA



La creciente demanda de alimentos, la escasez de agua y la transición hacia energías limpias nos obligan a replantear la forma en que producimos y gestionamos nuestros recursos. El nexo agua-energía-alimentos es un enfoque clave para desarrollar sistemas agrícolas resilientes y sostenibles.

Es crucial destacar que los cultivos y sus rendimientos se relacionan con varios aspectos que involucran la energía solar y el agua (de riego). Entre ellos, el proceso fotosintético que realizan las plantas es esencial para su crecimiento. Es mediante la fotosíntesis (Figura 1) que las plantas absorben (utilizando el pigmento clorofila) longitudes de onda específicas de la energía proveniente de la luz solar y la convierten en energía química (es decir convierten el CO_2 en moléculas orgánicas como azúcares), lo que les permite crecer y se puede traducir en el rendimiento de los cultivos.

LA SOSTENIBILIDAD EN LA AGRICULTURA (cont...)

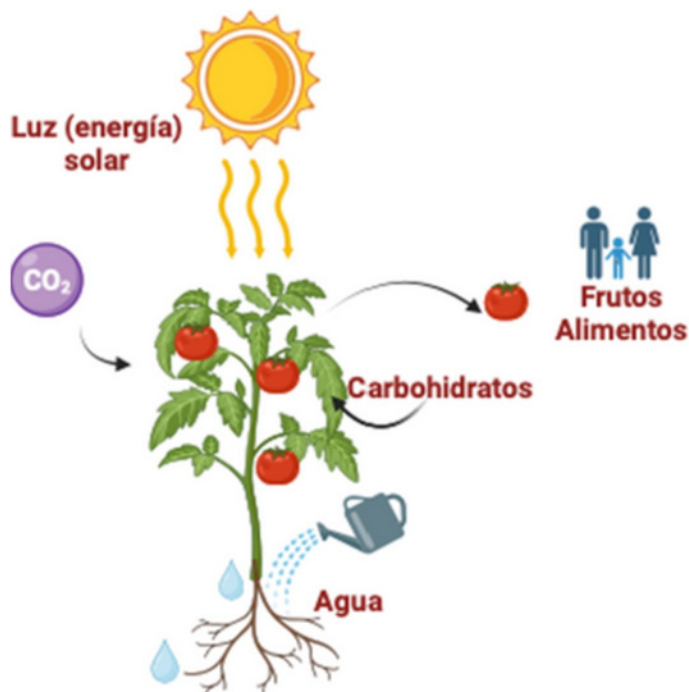


Figura 1. Ilustración de la fotosíntesis en las plantas y la conexión del agua-energía solar- alimentos.

Si bien el proceso fotosintético puede ser complejo, podemos mencionar que primero hay una fase luminosa (se requiere luz solar) y posteriormente una fase oscura (ya no se necesita luz). Dado los requerimientos de energía solar, y aquellos espacios en los que no es necesaria, es clave utilizarla de forma óptima ya que la evidencia acumulada sugiere que la luz juega un papel vital en el crecimiento y en el proceso del desarrollo de forma y estructura de las plantas. Además, se ha demostrado que, para algunos cultivos, como el del tomate, la temperatura afecta la calidad del fruto. También, existe una relación entre la cantidad de biomasa producida y la energía luminosa absorbida, dictada por la eficiencia del uso de la luz. Sin embargo, esta depende de varios factores como la intensidad y calidad de la luz, las características de la planta y las condiciones ambientales. (1)

Cabe destacar que, si bien es importante maximizar la transmisión de luz para incrementar la fotosíntesis, hay un nivel de saturación después del cual la eficiencia no mejorará significativamente. Hay que recordar que la radiación fotosintéticamente activa (denominada PAR, por sus siglas en inglés) se ha establecido como aquella fracción de la radiación electromagnética en la longitud de onda entre 400 y 700 nm (2). De hecho, existen efectos negativos por un exceso de intensidad de luz, por ejemplo, deshidratación, estrés térmico, entre otras, ya que la radiación solar en exceso no solo afectaría al desarrollo de la planta sino a los frutos (Figura 2). El estrés por calor, de forma eventual o constante, en las plantas puede conducir a una disminución del rendimiento económico de las plantas cultivadas (1). Es decir, los cultivos también son sensibles a las variaciones del clima. Temperaturas del aire cercanas al óptimo para cada planta favorecerá su crecimiento, las temperaturas bajas limitarán o afectarán su crecimiento y temperaturas altas, de manera constante durante varios días, pueden ser muy perjudiciales, sobre todo en suelos con baja humedad. Por ejemplo, para el maíz, el arroz y el sorgo temperaturas por encima de 33-35-40°C, respectivamente, afectan la viabilidad y producción de polen, y las temperaturas cálidas reducen el rendimiento del grano de maíz hasta en un 80-90% con respecto a un régimen de temperatura normal (3).

“...la radiación fotosintéticamente activa (denominada PAR, por sus siglas en inglés) se ha establecido como aquella fracción de la radiación electromagnética en la longitud de onda entre 400 y 700 nm...”

LA SOSTENIBILIDAD EN LA AGRICULTURA (cont...)

Otros factores ambientales como la luz y la cantidad de agua disponible influyen el comportamiento fisiológico de las plantas (1).

En este sentido, dado que el control de las condiciones ambientales y la distribución de la luz es clave para mejorar la eficiencia de la utilización de la energía solar y su impacto en los cultivos, se han desarrollado opciones para el control de los factores ambientales, desde los invernaderos hasta la recientemente incentivada tecnología agrovoltaica (Figura 2).

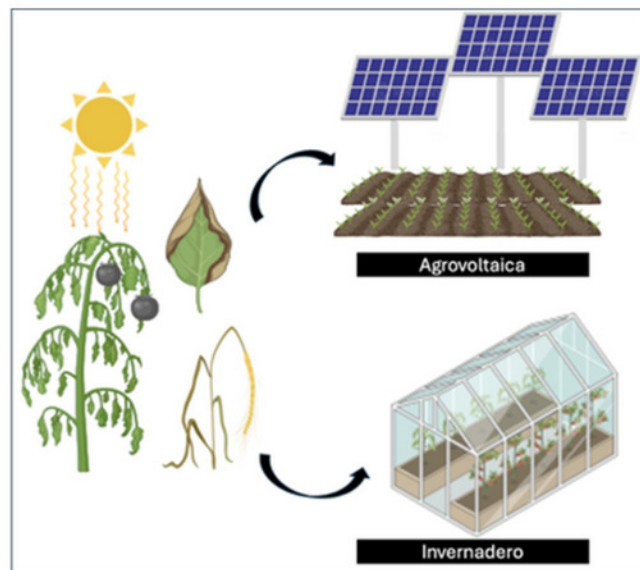


Figura 2. Efectos de un exceso de luz solar y temperatura sobre las plantas y dos soluciones: agrovoltaica e invernaderos.



AGROVOLTAICA

Figura 3. Parcela agrovoltaica sostenible y educativa (PASE), (tomado de <https://mexico.quadratin.com.mx/sembrara-unam-con-gobierno-proyectos-de-alimentacion-agua-y-energia/>)

Aunque el concepto surgió en Alemania durante la década de los 80, fue en los últimos diez años que la agrovoltaica cobró mayor relevancia, impulsada por estudios que demuestran sus múltiples beneficios. Esta tecnología resulta especialmente favorable para cultivos que no requieren exposición total al sol, ya que los paneles proporcionan una sombra parcial que reduce el estrés térmico en las plantas y favorece su desarrollo en climas cálidos.

¿QUÉ ES LA AGROVOLTAICA?

La agrovoltaica es una tecnología que combina de manera estratégica la producción agrícola y la generación de energía solar en una misma superficie, mediante la instalación de paneles solares elevados sobre terrenos de cultivo (Figura 3). Esta integración permite aprovechar de forma eficiente el espacio agrícola, captando energía solar para la producción de electricidad sin interrumpir las actividades agrícolas.

La agrovoltaica es una tecnología que combina de manera estratégica la producción agrícola y la generación de electricidad en una misma superficie, mediante la instalación de paneles solares elevados sobre terrenos de cultivo.

¿QUÉ ES LA AGROVOLTAÍCA? (cont...)

Entre sus principales ventajas destacan



Optimización del uso del suelo 🌿, al combinar la producción de alimentos y energía renovable.



Generación de electricidad limpia ⚡, que puede emplearse directamente para sistemas de bombeo e irrigación eficiente, reduciendo costos operativos y el consumo de agua.



Protección de los cultivos frente a la radiación solar intensa, al actuar los paneles como sombrillas que moderan las altas temperaturas.



Reducción de la evapotranspiración 💧, lo que contribuye a conservar la humedad del suelo, reducir el estrés hídrico en la planta y disminuir significativamente la demanda hídrica.



Aprovechamiento de la captación de agua de lluvia ☁️, esta estrategia aumenta la eficiencia hídrica del sistema, reduce la erosión del suelo y el escurrimiento de agua superficial.

Gracias a estos beneficios, cada vez más proyectos agrovoltaicos en el mundo se enfocan en el cultivo de pastizales, frutas, hortalizas, hongos y otros productos propios de la agricultura de interior. Algunos ejemplos destacados incluyen:



En México, la instalación de la parcela agrovoltaica sostenible educacional, impulsada por la UNAM, en colaboración con la Universidad de Arizona y la SECTEI del Gobierno de la Ciudad de México.



En España, aplicaciones exitosas en viñedos mediante el proyecto WineSolar, así como en huertos agro-solares para el cultivo de cereales y setas.



En Alemania, donde existen sistemas agrovoltaicos de gran escala (del orden de gigavatios) dedicados no solo a cultivos de frutas y vegetales, sino también a actividades ganaderas, como la cría de vacas, terneros y aves de corral.



En Estados Unidos, destaca la planta agrovoltaica más grande del país, ubicada en Maine, dedicada al cultivo de arándanos. Además, el Departamento de Energía impulsa el desarrollo de proyectos agrovoltaicos a través del programa InSPIRE (Innovative Solar Practices Integrated with Rural Economies and Ecosystems).

En un contexto global marcado por los efectos del cambio climático (que se reflejan en temperaturas cada vez más cálidas y eventos climáticos extremos), la agrovoltaica representa una alternativa viable para mitigar los impactos negativos sobre la productividad agrícola y garantizar la seguridad alimentaria.

CIRCULARIDAD EN LA AGRICULTURA: ¡LA PIRÓLISIS SOLAR COMO ALIADA!

Si bien la incorporación de energía solar fotovoltaica en sistemas agrovoltaicos impulsa un modelo agrícola más sostenible, es igualmente crucial considerar la gestión adecuada de los residuos generados durante la producción agrícola. Bajo esta perspectiva, surge la visión de una economía circular aplicada a la agricultura, cuyo objetivo es maximizar el aprovechamiento de los recursos y minimizar los impactos ambientales, mediante prácticas como la conservación del suelo, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la valorización de residuos orgánicos.

En este contexto, los desechos agrícolas generados en huertos agrovoltaicos (lo que queda después de que se ha cosechado el cultivo, como tallos y rastrojos, hojas y vainas de semillas), representan una oportunidad para cerrar el ciclo productivo mediante tecnologías de conversión limpia. Una de las alternativas más prometedoras para el aprovechamiento de residuos agrícolas es la pirólisis solar, un proceso termoquímico en el que la biomasa se descompone en ausencia de oxígeno (o en condiciones de oxígeno muy limitado), generando tres productos principales: biochar, bioaceite y gas de síntesis (Figura 4a).



"La incorporación de la pirólisis solar en sistemas agrovoltaicos no solo permite valorizar los residuos agrícolas, sino que también fortalece la circularidad del modelo productivo..."

A diferencia de la pirólisis convencional (que requiere el uso de combustibles fósiles para alcanzar temperaturas de entre 400 y 800 °C), la pirólisis solar emplea energía térmica del sol como fuente de calor, haciendo del proceso una alternativa limpia, renovable y con una huella de carbono significativamente menor. Este tipo de pirólisis se lleva a cabo en un horno solar (Figura 4b), un sistema diseñado para concentrar y controlar la radiación solar con alta precisión. El horno solar está compuesto por dos elementos ópticos principales. El primero es un heliostato, un espejo plano motorizado que sigue el movimiento aparente del sol a lo largo del día y redirige su radiación hacia un segundo componente óptico: un espejo parabólico con forma de plato, encargado de concentrar los rayos solares en un punto focal. En ese punto focal se encuentra instalado el reactor solar, donde tiene lugar el proceso de pirólisis de la biomasa. Adicionalmente, el sistema incorpora un atenuador (también conocido como regulador de flujo radiativo), el cual permite modular la cantidad de potencia térmica que incide sobre el reactor, posibilitando un control preciso de la temperatura durante el proceso. Gracias a esta tecnología, es posible alcanzar temperaturas elevadas controladas y rápidas, de forma completamente sostenible, facilitando la conversión de residuos orgánicos en productos de valor agregado y reduciendo al mismo tiempo el impacto ambiental.

La incorporación de la pirólisis solar en sistemas agrovoltaicos no solo permite valorizar los residuos agrícolas, sino que también fortalece la circularidad del modelo productivo, transformando los desechos en recursos útiles y promoviendo una agricultura sustentable más resiliente, eficiente y alineada con los desafíos del cambio climático.

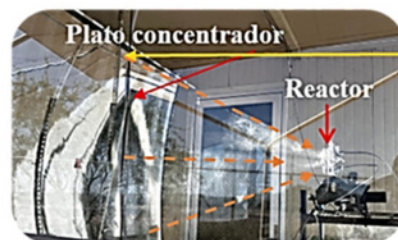
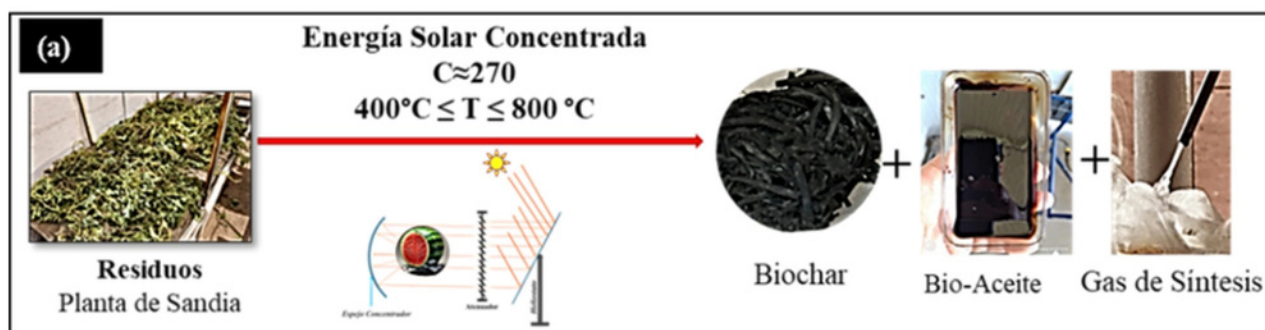


Figura 4. (a) Productos de la pirólisis solar (b) Horno solar para pirólisis de la Plataforma Solar de Hermosillo.

El biochar obtenido, como producto de la gestión de residuos, es un material carbonoso altamente estable que puede permanecer en el suelo durante décadas. Tiene una estructura porosa y eso lo convierte en un excelente mejorador del suelo, con beneficios clave (4) como:



Aumento de la fertilidad y productividad agrícola 🌱⚡



Mejora en la retención de agua y eficiencia del riego 💧⚡



Secuestro de carbono, contribuyendo a la mitigación del cambio climático 🌍🌱⚡



Alternativa sostenible a fertilizantes químicos 🌱🚫⚡



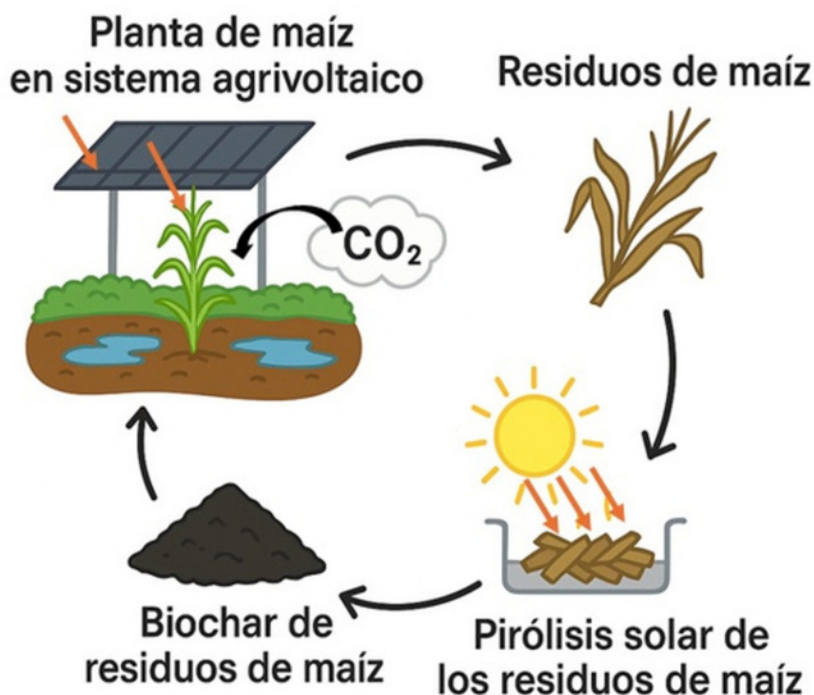
La incorporación de la pirólisis solar lenta en el sector agrovoltaico promovería la gestión sostenible de residuos, impulsando la producción de biochar como un insumo clave para mejorar la calidad del suelo y la productividad agrícola, alineándose con estrategias de economía circular, captura de carbono y energías limpias y renovables.

CONCLUSIÓN

El modelo agrovoltaico circular, articulado bajo el nexo Agua-Energía-Alimentos, representa una solución integral para fortalecer la seguridad alimentaria y avanzar hacia una transición energética sostenible, generando beneficios ambientales, sociales y económicos a nivel global. Su desarrollo requiere de políticas públicas efectivas, inversión estratégica y colaboración entre los sectores agrícola, energético y científico.

Además, una gestión responsable enfocada en la protección del agua, la biodiversidad y los ecosistemas permitirá maximizar su impacto, especialmente en regiones áridas y rurales afectadas por el cambio climático.

En suma, la agrovoltaica no solo es una alternativa tecnológica, sino un llamado a la acción para construir un futuro más resiliente y equitativo.



BIBLIOGRAFÍA

Wahid A, Gelani S, Ashraf M, Foolad MR. 2007. Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany* 61:199–223.

Mõttus M, Sulev M, Baret F, Lopez-Lozano R, Reinart A. 2012. Photosynthetically Active Radiation: Measurement and modeling, p. 7902–7932. In Meyers, RA (ed.), *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. Springer, New York, NY

Hatfield JL, Prueger JH. 2015. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes* 10:4–10

Masud MA AI, Shin WS, Sarker A, Septian A, Das K, Deepo DM, Iqbal MA, Islam ARMT, Malafaia G. 2023. A critical review of sustainable application of biochar for green remediation: Research uncertainty and future directions. *Science of the Total Environment* 904:166813

