

Roberto Carlos Barragán Campos y Guillermo García-Torales

Las plantas y la luz solar

La vegetación proporciona numerosos beneficios y es indispensable para el desarrollo de la humanidad. Las plantas se han estudiado desde los principios de la civilización; sin embargo, es en la época moderna cuando la tecnología ha abierto la posibilidad de conocerlas desde otra perspectiva, con más detalle y sobre todo en su gran diversidad. En este artículo se explica cómo es la radiación solar y se describe la estructura interna de las hojas para entender la interacción de las plantas con la luz del Sol.

Introducción

El reino *plantae*, o de las plantas, es uno de los más importantes en nuestro planeta ya que es fundamental para la simbiosis entre todos los seres vivos, en la medida en que generan las condiciones de supervivencia de mamíferos, insectos y microorganismos (Oré, 2020). Las plantas nos suministran nutrientes, a través de la dieta extraemos compuestos aromáticos, vitaminas y fármacos. Su existencia es fundamental en la conservación de los mantos acuíferos, la regulación térmica y la absorción de dióxido de carbono, además de que evitan la erosión de la tierra (Palou, 2017). Por otro lado, son parte primordial en la producción de energía, la fabricación de muebles y utensilios, así como en el transporte y empaque de mercancías. Es tanta la dependencia de las plantas en la vida diaria que en los últimos años se han realizado estrategias para aumentar su reproducción mediante técnicas de ingeniería genética, agricultura de precisión e invernaderos especializados. Las técnicas actuales aplican los conocimientos físicos de la interacción de la radiación solar con la estructura interna de la vegetación, para aumentar la producción de frutas y verduras; prever afectaciones a gran escala ocasionadas por insectos, hongos o bacterias; garantizar la calidad de los cultivos, e incluso prevenir incendios forestales para preservar bosques, evitar catástrofes y cuidar el medio ambiente.

Energizando a la vegetación

El Sol es el cuerpo celeste más grande de nuestro sistema planetario y el único que proporciona energía al sistema solar. Las emisiones del astro rey contienen un



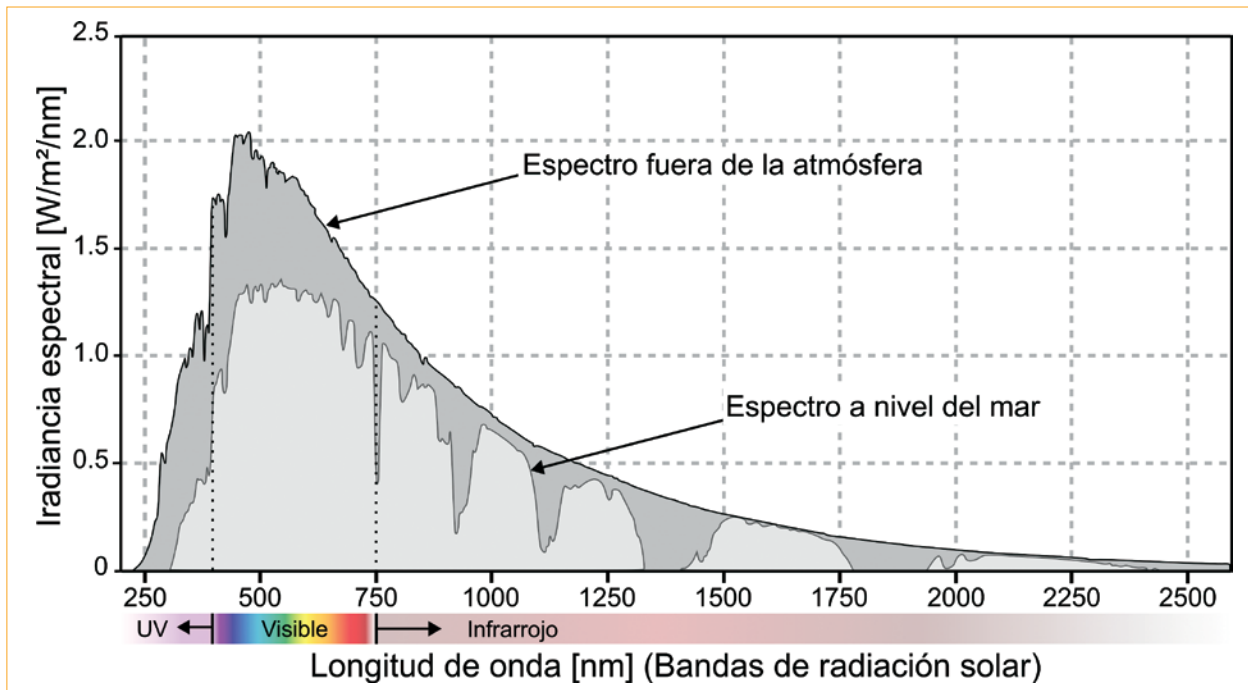


Figura 1. El espectro de radiación solar sobre la atmósfera y a nivel del mar que se considera que es el que incide en la superficie de la Tierra. Cada longitud de onda emitida por el Sol tiene un nivel de energía diferente. Datos tomados de *G173-03, ASTM International*.

conjunto de radiaciones electromagnéticas de diferente energía capaces de viajar a través del espacio. Estas radiaciones o **longitudes de onda** las identificamos como colores, pero, asombrosamente, el mayor número de las radiaciones que provienen de la estrella no pueden ser vistas por el ojo humano, como los rayos ultravioletas, que contienen longitudes de onda de 200 a 400 nanómetros (nm) y la radiación infrarroja, que va de los 700 nm a los 2 500 nm. Cuando hablamos de luz, nos referimos a la radiación electromagnética que podemos ver y abarca de los 400 nm a los 700 nm. Al conjunto de las radiaciones ultravioleta, visible e infrarroja se le conoce como el espectro de radiación solar, o espectro solar, el cual se ilustra en la **Figura 1**.

El espectro solar contiene varias bandas, formadas por el conjunto de radiaciones agrupadas por su similitud energética; por ejemplo, la banda del color verde corresponde a radiaciones que percibimos en diferentes tonos de verde, cada tono con un nivel de energía distinto. De manera similar, en la región del infrarrojo se definen otras bandas de radiación, como el infrarrojo cercano de 700 a 1 350 nm, el infrarrojo

medio de 1.35 a 8 micrómetros (μm) y el infrarrojo lejano de 8 a 30 μm .

El principio de conservación de la energía establece que “La energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma”; así también, la energía solar que llega a nuestro planeta como radiación (**Figura 1**), se transforma dando lugar a tres fenómenos: reflexión, absorción y transmisión. Una parte de la energía se refleja en la superficie terrestre hacia el espacio exterior, por eso es posible observar el planeta desde la Estación Espacial Internacional; en cambio, otra parte de esa energía solar se transmite a través de la atmósfera, se esparce y forma los colores del cielo debido a las partículas que se encuentra en su camino. Por último, la energía tarde o temprano termina siendo absorbida por toda la superficie del planeta, proporcionando calor y dando el color a los objetos animados y no animados; por ejemplo, un aguacate madura gracias a la radiación infrarroja y su cáscara pasa del color verde al color negro, lo que significa que absorbe todas las bandas de color, desde el azul hasta el rojo, incluyendo el verde original. De esta manera, la radiación del Sol llega a todos los árboles y plantas, incidiendo

Longitud de onda
Distancia entre dos puntos que definen un periodo cuando la luz se representa como una onda; a menor distancia, la luz tiene mayor energía.

en el interior de sus hojas y, por tanto, energizando a la vegetación (Chuvieco, 2008).

La vegetación y sus colores

Quizás alguna vez te has preguntado, ¿por qué las plantas son verdes? La Tierra, nuestro planeta, es el único que absorbe energía a través de mecanismos biológicos, principalmente relacionados con la vegetación en donde predomina el color verde. Una explicación detallada a esta pregunta requiere del conocimiento de la composición interna de las hojas, ya que éstas determinan las características visibles de la vegetación.

La estructura básica de una planta está constituida por la raíz, el tallo y la hoja. La raíz tiene la función de anclar mecánicamente el vegetal a algún sustrato (tierra, agua, piedras, etc.), absorber y conducir los nutrientes, así como el agua y minerales hacia el tallo y las hojas. El tallo dirige las hojas hacia la luz, evitando la sombra de otros vegetales u objetos próximos; también conduce agua, minerales y moléculas orgánicas entre la raíz y las hojas. Las hojas, que se presentan en gran diversidad de tamaños y formas, son las que predominan en la cubierta vegetal de la Tierra y son el principal órgano fotosintético; es decir, el elemento que más absorbe radiación solar para transformarla en energía para la planta.

Las hojas tienen diferentes espesores y composiciones, por lo que pueden ser traslúcidas u opacas; en ambos casos, generalmente el color que percibimos cuando están sanas es el verde que forma el follaje de árboles y arbustos, así como de pastizales y plantas en general (Chuvieco, 2008).

La **Figura 2** muestra un corte transversal de la estructura interna de una hoja simple. La cutícula es una capa de cera generada por la epidermis que refleja principalmente la radiación infrarroja y permite el paso de luz visible; tiene además la función de evitar la pérdida de agua debida al calor generado por la absorción de luz solar. La epidermis es una capa formada por una fila de células que protege a la parte interna de abrasiones, así como de la intrusión de hongos y bacterias causantes de enfermedades. El mesófilo en empalizada es una capa compacta de células ordenadas que debe su nombre a la forma alargada de las células que la componen. El mesófilo esponjoso consiste en células con mayores espacios intercelulares para permitir el flujo de gases que ingresan desde las estomas, que son las células encargadas de captar dióxido de carbono y expulsar oxígeno.

Ambos mesófilos están conformados por células vegetales que contienen unos minúsculos organelos llamados cloroplastos, donde se encuentran los pigmentos fotosintéticos que absorben ciertas bandas de luz solar. Los pigmentos son principalmente clo-

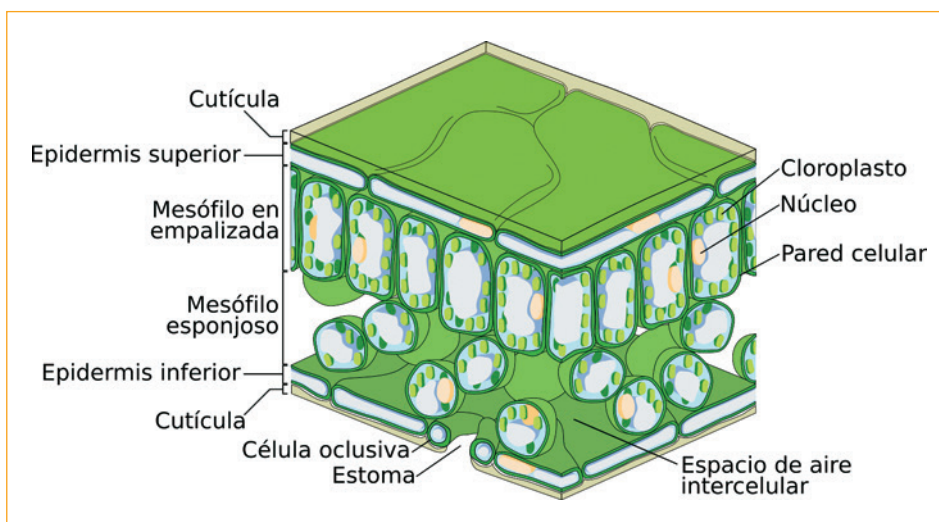


Figura 2. Estructura interna de las hojas junto con los elementos celulares que más interactúan con la radiación solar (Serbin y Townsend, 2020). Fuente de la imagen: Wikimedia, Sephyris (CC BY-SA 3.0).

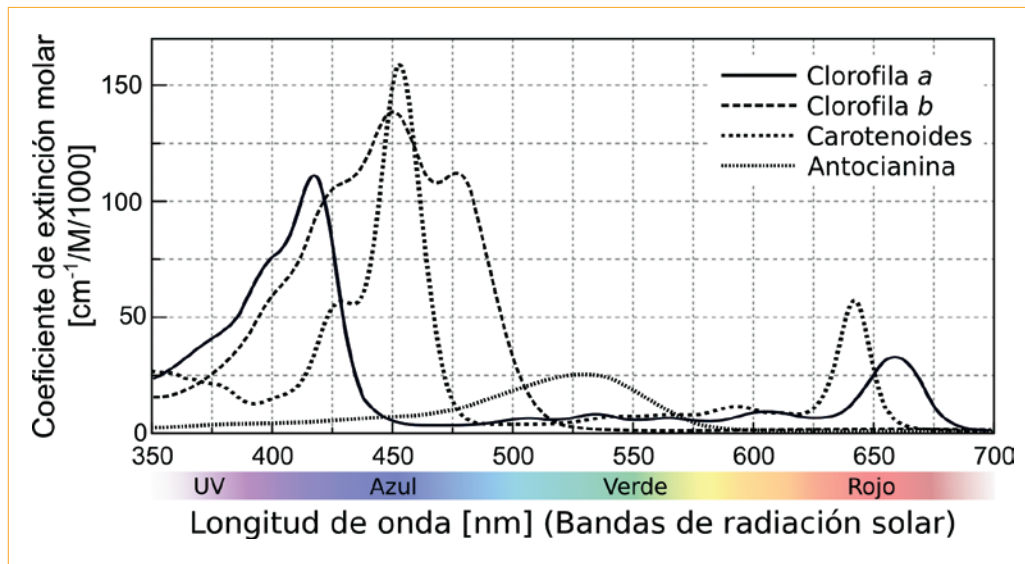


Figura 3. Absorción de radiación visible de los principales pigmentos de las plantas. Datos tomados de *Database of PhotochemCAD*.

rofilas y carotenoides, que son los encargados de realizar la conversión de energía lumínica en energía química; es decir, la fotosíntesis. En la **Figura 3** se observan las gráficas de absorción de estos pigmentos, los picos representan la absorción y el color de fondo indica la banda que se absorberá. Los componentes que más absorben son las clorofilas y los carotenoides en las bandas de los colores violeta, azul y rojos; por tanto, las bandas que se transmiten y reflejan principalmente son las que se encuentran en el color verde, lo que da el color general de la vegetación, aun cuando las **antocianinas** absorben este color porque sigue siendo relativamente mayor la intensidad de la luz en la banda de los tonos verdes (Barragán y cols., 2020). Esto se debe a que la antocianina es un pigmento con poca presencia en las hojas sanas, aunado a que el punto máximo de irradiación del espectro solar también se encuentra en esta banda (véase la **Figura 1**).

En la temporada de otoño e invierno, diferentes especies de vegetación comienzan a renovar sus hojas cambiando el color del follaje; algunos adquieren colores amarillentos y otros tonos rojizos, dando el color característico de los paisajes de otoño, sobre todo en las partes más próximas a los polos del planeta. En la región tropical esto ocurre en menos

especies y en menor medida, ya que la radiación solar sigue siendo intensa aún en invierno. El cambio de coloración se debe a la degradación de las clorofilas y a una ligera producción de antocianinas, que son biomoléculas que ayudan a absorber el color verde y parte del ultravioleta como un mecanismo de protección para las hojas, lo que acentúa diferentes tonos de color entre amarillos y rojos.

■ Firmas espectrales de las plantas

Las bandas de radiación infrarroja proporcionan información de la estructura celular de las hojas y del contenido de agua. La estructura celular se forma a partir del acomodo de las células de acuerdo con las capas mencionadas en la **Figura 2**, manteniendo un cierto tamaño y ordenamiento cuando la planta está sana. Cuando el follaje comienza a secarse la cutícula se rompe, lo que acelera la deshidratación de las paredes celulares. La hoja se decolora ligeramente con la pérdida de agua, aunque mantiene la estructura celular gracias al polímero natural más abundante de la Tierra, la celulosa.

Las paredes celulares de la hoja están formadas principalmente por celulosa y lignina, las que en conjunto dan rigidez a los troncos, ramas y hojas. El

Antocianinas ▶ Pigmentos solubles en agua contenidos en las vacuolas de las células vegetales que dan el color rojo, púrpura o azul a las hojas, flores y frutos.

contenido total de una hoja se constituye en promedio por un 38 % de celulosa y un 18 % de lignina, mientras que el contenido de agua puede alcanzar valores de hasta 40 %. De esta manera, la celulosa es el elemento que prevalece aun ante los cambios más intensos de hidratación de la hoja (Kokaly y cols., 2009). Después de un tiempo, las hojas se separan de la planta y caen al suelo; en ese momento comienza un proceso de biodegradación. Las hojas empiezan a degradarse alterando el ordenamiento original de sus células. Ahora las cadenas de celulosa sufren una desintegración inducida por la acción de la humedad del ambiente, la radiación solar, los cambios térmicos y por microorganismos. Estos cambios se observarán como variaciones en las bandas del infrarrojo.

En la **Figura 4** se compara la **firma espectral** de las plantas sanas respecto de la vegetación seca o en proceso de envejecimiento. Se considera todo el espectro solar, indicando en el eje vertical el porcentaje de radiación solar reflejada y exhibiendo las diferencias en cada banda espectral. La reflexión de radiación en la banda del infrarrojo cercano permite inferir la degradación de la estructura celular de



la hoja, mientras que la banda del infrarrojo medio permite estimar fundamentalmente la cantidad de agua que contiene la vegetación, aunque también muestra parte de la descomposición de la celulosa. En la **Figura 5** se compara la reflexión del espectro solar en un árbol cuando se encuentra más hidratado y cuando su follaje pierde agua y su pigmentación cambia (Manzo y Meave, 2003).

Firma espectral
Cantidad de luz reflejada por un objeto, separada por longitudes de onda o bandas de colores.

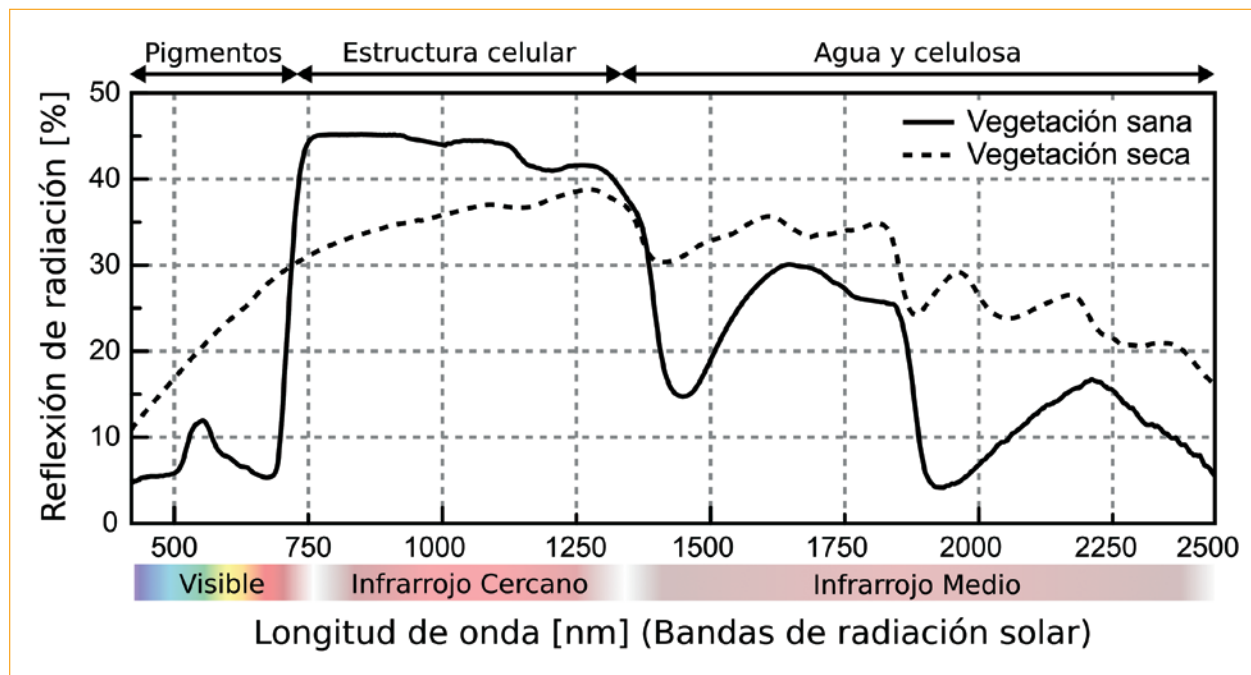


Figura 4. Firma de vegetación sana y vegetación seca formada por la radiación solar reflejada. Datos tomados de *USGS Spectral Library Version 7: U. S. Geological Survey Data Series*.

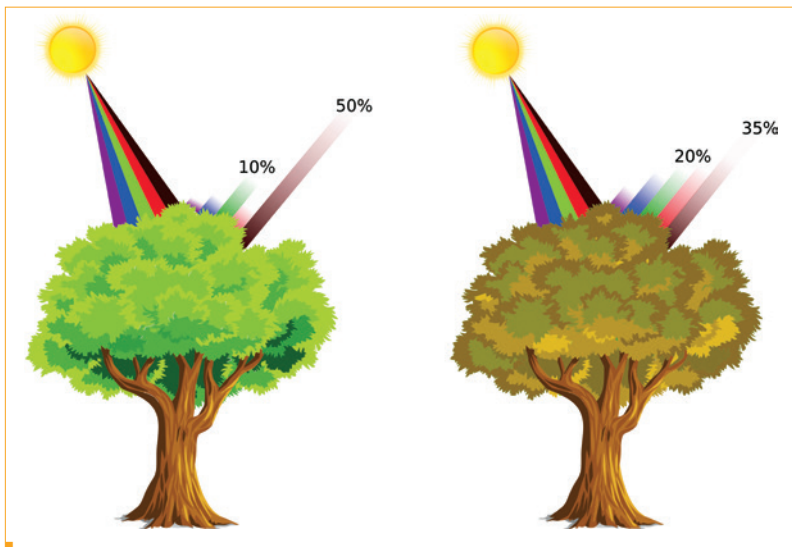


Figura 5. Bandas del espectro solar reflejadas en el follaje de un árbol sano en comparación con las bandas reflejadas por el mismo árbol, pero parcialmente seco.

Las bandas de colores provenientes del Sol que se muestran del lado izquierdo representan la radiación que incide sobre el árbol, mientras que las bandas de colores desvanecidas del lado derecho corresponden a la radiación solar reflejada. La cantidad de luz que se refleja en cada banda coincide con los porcentajes de reflexión de la **Figura 4**. De esta manera, la cantidad de pigmentos, la deshidratación, la falta de

nutrientes y las enfermedades de la vegetación modifican el espectro solar reflejado generando firmas espectrales únicas de las plantas.

■ ■ ■ Aplicaciones de las firmas espectrales

■ Existen muchas aplicaciones que encuentran utilidad al conocer la interacción de la luz solar con la vegetación. A lo largo del tiempo se han utilizado para analizar bosques, cultivos, pastizales, huertos urbanos y cultivos verticales. A continuación, se mencionan algunos ejemplos muy significativos para el desarrollo y mejoramiento de las condiciones de vida en nuestro planeta.

En la industria agroalimentaria se utilizan espectrorradiómetros (**Figura 6**) para medir el porcentaje de radiación espectral reflejada, con la ayuda de imágenes capturadas por aeronaves o drones. Las imágenes así capturadas son denominadas multispectrales o hiperespectrales, según la cantidad de bandas que se puedan observar. De este modo se estima matemáticamente la cantidad de clorofilas, que a su vez establecen los indicadores de crecimiento y salud de la vegetación.

Esta misma técnica puede usarse para medir los niveles de nitrógeno en cultivos de amplia extensión



Figura 6. Medición de las firmas espectrales de un cultivo. El espectrorradiómetro está sobre la espalda del hombre, que también está sujetando el cabezal de medición que se conecta al equipo mediante una fibra óptica. La joven está sujetando un material de alta reflexión para calibrar el equipo, previo a las mediciones de las firmas espectrales de la plantación. Fuente de la imagen: página web de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Gobierno de México.

y así determinar las cantidades de nutrientes que requieren para mejorar la calidad y cantidad de producción, o bien se pueden detectar oportunamente brotes de plagas o enfermedades para frenarlas antes de que se expandan.

En los bosques las técnicas de análisis de firmas espectrales juegan un papel importante, pues proporcionan información crucial para la detección de posibles focos de incendios forestales, ya que la firma espectral de la vegetación permite identificar zonas con biomasa viva o muerta. Una vez iniciado un incendio, las imágenes hiperespectrales capturadas con satélites permiten cuantificar el daño y monitorear la recuperación de las áreas dañadas.

Conclusiones

La luz que viaja desde el Sol hasta la Tierra interactúa con la vegetación absorbiendo parte de ella y reflejando la restante. Esta interacción nos permite conocer y describir características de la vegetación de maneras diferentes mediante su firma espectral. Las diversas formas de representación de las plantas aumentan las técnicas aplicables al desarrollo sustentable de la producción y cuidados del medio ambiente. En particular, la información contenida en las firmas espectrales de las hojas abre una ventana para observar con detalle su interior y entender los pormenores de los cambios naturales de su composición, en beneficio de la preservación de todos los seres vivos a su alrededor.

Roberto Carlos Barragán Campos

Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías,
Universidad de Guadalajara.
robertobarragan.gdl@gmail.com

Guillermo García-Torales

Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías,
Universidad de Guadalajara.
garcia.torales@academicos.udg.mx

Referencias específicas

- Barragán, R. C., J. Castrellon-Uribe, G. García-Torales y A. Rodríguez-Rivas (2020), "IR characterization of plant leaves, endemic to semi-tropical regions, in two senescent states". *Applied Optics*, 59(17): E126-E133.
- Chuvieco, E. (2008), "Principios físicos de teledetección" (cap. 1), *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*, Barcelona, Ariel Ciencia, pp. 43-85.
- Kokaly, R. F., G. P. Asner, S. V. Ollinger, M. E. Martin y C. A. Wessman (2009), "Characterizing canopy biochemistry from imaging spectroscopy and its application to ecosystem studies", *Remote Sensing of Environment*, 113(1): S78-S91.
- Manzo Delgado, L. y J. A. Meave (2003), "La vegetación vista desde el espacio: la fenología foliar a través de percepción remota", *Ciencia*, Academia Mexicana de Ciencias, 54:18-28.
- Oré, D. (2020), "Con jardines urbanos buscan salvar al colibrí en México", *Thomson Reuters*. Disponible en: <<https://www.reuters.com/article/medioambiente-mexico-colibries-idLTAKBN20J26M>>, consultado el 11 de mayo de 2024.
- Palou, N. (2017), "9 beneficios de los árboles urbanos", *La Vanguardia*. Disponible en: <<https://www.lavanguardia.com/vivo/ecologia/20170111/413239036420/arboles-urbanos-beneficios-ciudades-polucion.html>>, consultado el 11 de mayo de 2024.
- Serbin, S. P. y P. A. Townsend (2020), "Scaling Functional Traits from Leaves to Canopies", en J. Cavender, J. A. Gamon y P. A. Townsend (eds.), *Remote Sensing of Plant Biodiversity*, Suiza, Springer, pp. 43-82.

