

Alan A. Calderón Velderrain, Miguel A. Alonso Arévalo y Enrique A. Hernández Elías

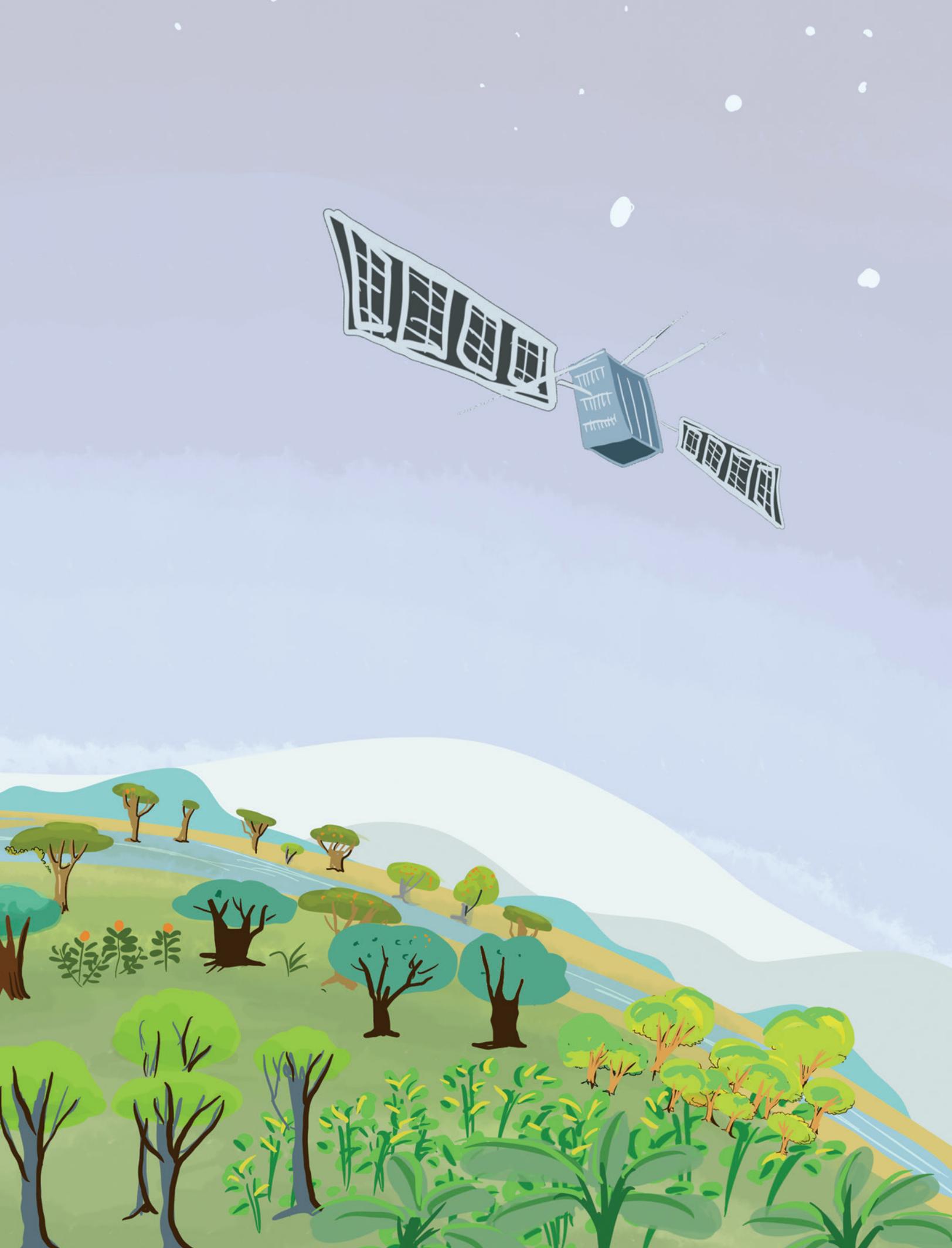
Los satélites te dirán qué tan saludables están las plantas

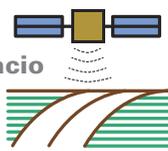
Los sistemas satelitales dan múltiples servicios: predecir el clima, combatir los problemas ambientales, mejorar la productividad agrícola, dar acceso a internet e informar acerca de la salud de la vegetación. Los satélites utilizan dispositivos que les permiten ver desde el espacio la luz que interviene en la fotosíntesis; de esta manera, miden la cantidad de ciertos tipos de luz que la planta absorbe y refleja para saber si está enferma o saludable.

Satélites

En la ciencia y tecnología espacial definimos un satélite como un cuerpo celeste o vehículo espacial (ya sea una luna, planeta o máquina) el cual orbita alrededor de una estrella o un planeta. De manera más común, cuando hablamos de satélites nos referimos a los satélites artificiales; es decir, máquinas que son lanzadas al espacio y que giran alrededor de la Tierra.







Existen distintos criterios para clasificar a los satélites artificiales. Según su funcionalidad, pueden ser:

1. **Satélites de reconocimiento:** son empleados para fines militares; por ejemplo, en espionaje o monitoreo de imágenes de sitios de interés para las agencias de inteligencia.
2. **Satélites de observación terrestre:** son utilizados para fines no militares, como los satélites meteorológicos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de Estados Unidos de América, los cuales transmiten información de las condiciones de temperatura del mar, la tierra, las nubes; también se pueden utilizar para observar la evolución de los huracanes y otros fenómenos.
3. **Satélites astronómicos:** son similares a los satélites de observación terrestre, pero las cámaras y sensores apuntan hacia el espacio exterior. Ayudan a estudiar y descubrir nuevos planetas, estrellas y todo lo que se encuentra fuera de la Tierra.
4. **Satélites de comunicaciones:** son los que utilizamos de manera más directa en nuestra vida cotidiana; por ejemplo, para los servicios de televisión por satélite, cuando vemos un partido de fútbol se que está jugando a miles de kilómetros de donde vivimos.

De igual manera, los satélites se pueden clasificar según su peso:

1. Satélites grandes (más de 1 000 kg).
2. Satélites medianos (entre 500 y 1 000 kg).
3. Minisatélites (entre 100 y 500 kg).
4. Microsatélites (entre 10 y 100 kg).
5. Nanosatélites (entre 1 y 10 kg).
6. Picosatélites (entre 100 g y 1 kg).
7. Femtosatélites (menos de 100 g).

Es importante tener en cuenta que las dimensiones de un satélite no están siempre relacionadas con su peso, pero es una buena aproximación decir que los satélites grandes suelen tener medidas de hasta $3 \times 3 \times 3$ m, mientras que los nanosatélites llegan

a tener tamaños de $10 \times 10 \times 10$ cm. En este caso, el término nanosatélite no implica necesariamente que se utilice nanotecnología ni que tengan dimensiones nanométricas.

Otra clasificación de los satélites es según su órbita. Éstos pueden ser:

1. Satélites de órbita baja terrestre (desde 0 hasta 2 000 km).
2. Satélites de órbita media terrestre (desde 2 000 hasta 35 786 km).
3. Satélites de órbita geostacionaria (exactamente 35 786 km).
4. Satélites de órbita alta terrestre (mayor a 35 786 km).

Además de la altitud de la órbita, los satélites se pueden clasificar según qué tan circular u ovalada es su trayectoria. Los satélites de órbita baja (LEO) suelen tener órbitas altamente circulares y se desplazan a velocidades de entre 7 y 9 km/s. Este tipo de satélites suele dar la vuelta al planeta cada 90 minutos, lo cual se llama periodo orbital. Por otra parte, los satélites geostacionarios (GEO) tienen una órbita circular y un periodo orbital de 24 horas; por esta razón, nosotros en la superficie terrestre siempre los vemos como si estuvieran en el mismo sitio, y por eso las antenas de televisión satelital siempre apuntan en la misma dirección.

Los satélites empleados en la actualidad para medir la salud de la vegetación suelen estar en órbitas bajas. Esto ayuda a disminuir significativamente los costos de lanzamiento y del sistema óptico, debido a que hay una menor distancia entre el satélite y la superficie de la Tierra. Un ejemplo es el satélite Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea, el cual se encuentra en una órbita baja (a 785 km sobre el nivel del mar), pesa cerca de 1 000 kg y tiene dimensiones similares a las de un automóvil compacto ($3.4 \times 1.8 \times 2.35$ m).

Percepción remota

La percepción remota, también conocida como teledetección, es el nombre de la ciencia que se de-

Recuadro 1. El espectro electromagnético

Actualmente los satélites de percepción remota llevan a bordo radiómetros que miden la radiación producida por las ondas electromagnéticas reflejadas o emitidas por la superficie de la Tierra. A estas ondas se les llama electromagnéticas porque consisten en ondas eléctricas y magnéticas combinadas.

La unidad fundamental para medir un fenómeno electromagnético es el fotón; ésta es la menor cantidad de energía electromagnética para un tipo de onda particular. Los fotones no tienen masa y se mueven a la velocidad de la luz en forma de ondas, de manera muy parecida a las olas que se propagan en los océanos. A la distancia que hay entre dos crestas

sucesivas de una onda electromagnética particular se le denomina longitud de onda. Al conjunto total de ondas electromagnéticas se le conoce como espectro electromagnético, el cual se divide en regiones cuyo nombre describe la naturaleza de las ondas, como se ilustra en la Figura 1.

En el espectro electromagnético, la zona correspondiente a la luz que los humanos podemos ver es bastante pequeña y lo que percibimos como un color es en realidad un tipo de radiación con una longitud de onda correspondiente. Por ejemplo, las tonalidades de verde que vemos corresponden a longitudes de onda que oscilan en el rango de 500-565 nanómetros.

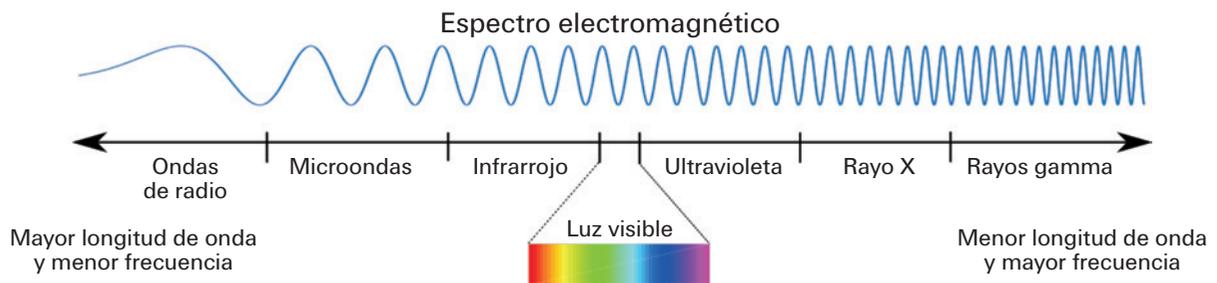


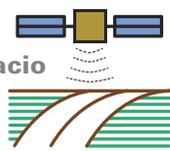
Figura 1. Espectro electromagnético.

dica a identificar, observar y medir los objetos sin estar en contacto físico con ellos. Esta actividad tuvo sus orígenes hace casi 200 años, cuando se inventó la cámara fotográfica. En aquella época, a mediados del siglo XIX, en un globo aerostático se fijaba una cámara fotográfica que apuntaba hacia el suelo y luego se usaban las fotografías obtenidas para hacer mapas. A principios del siglo XX, las cámaras montadas en aviones proporcionaron vistas de áreas de superficie bastante grandes, lo cual resultó de gran utilidad especialmente en aplicaciones de reconocimiento aéreo. Desde entonces hasta inicios de la década de 1960, la fotografía aérea siguió siendo la única herramienta utilizada para representar la superficie de la Tierra. Fue en ese tiempo que comenzó la era espacial y la percepción remota tuvo una nueva faceta de desarrollo.

Medir la salud de la vegetación

Estamos acostumbrados a ignorar todo el tiempo a las plantas y los árboles que nos rodean, aun cuando –irónicamente– casi todos los aspectos de nuestra vida dependen de ellos. Las plantas y los árboles nos proporcionan alimentos y medicamentos, nos dan materiales para construir viviendas, nos sirven para fabricar las prendas que vestimos y, por si fuera poco, absorben el nocivo dióxido de carbono que generamos y liberan el oxígeno que respiramos.

Por lo anterior, cualquier cambio drástico en la vegetación que nos rodea tiene un impacto directo en nuestra salud, en el ambiente y hasta en la economía. Un ejemplo es la contingencia ambiental provocada por los incendios forestales y la contaminación en la Zona Metropolitana del Valle de México durante mayo de 2019. Conscientes de esta



situación, durante la década de 1970 los científicos comenzaron a estudiar, mediante las primeras imágenes obtenidas desde el espacio, el ciclo de vida de las plantas para hacer un mapa de la densidad de la vegetación verde sobre la Tierra.

Como mencionamos en el Recuadro 1, muchos colores diferentes conforman la luz solar visible. Al medir la luz visible e infrarroja que es reflejada por la superficie de la Tierra es posible conocer la cantidad y el estado de la vegetación. El algoritmo utilizado para determinar la concentración y el vigor de las plantas se conoce como índice de vegetación, el cual se obtiene al aplicar una fórmula matemática predeterminada a la intensidad medida en dos o más longitudes de onda.

Cuando la luz solar incide sobre la superficie terrestre, cada tipo de material absorbe ciertas longitudes de onda y refleja otras; dicho fenómeno se llama firma espectral. Este principio es el que se utiliza para determinar la cantidad de plantas verdes en un área sobre la superficie de la Tierra, a partir de la idea que se ilustra en la Figura 2. El pigmento en las hojas de las plantas (la clorofila) absorbe la luz roja y azul para su uso en el proceso de conversión de la luz a materia orgánica, mejor conocido como foto-

síntesis. De manera contraria, las hojas de las plantas reflejan fuertemente la luz del infrarrojo cercano y también el verde. Si pudiéramos ver el infrarrojo con nuestros ojos, las plantas en su mayoría serían color “infrarrojo” en lugar de verde. Cuantas más hojas tiene una planta, más se reflejan y absorben estas longitudes de onda, respectivamente, lo cual facilita la detección a bordo de un satélite a cientos de kilómetros de altura. La firma espectral para una planta saludable también se ilustra en la Figura 2.

Al dispositivo que utilizan los satélites para medir la radiación en el espectro visible se le conoce como cámara multispectral, la cual permite generar imágenes de los objetos en función de la longitud de onda que están reflejando o emitiendo. Por ejemplo, una cámara multispectral de cuatro bandas (véase el Recuadro 2), en lugar de proporcionar una sola imagen, como una cámara tradicional, va a obtener cuatro imágenes simultáneas, cada una correspondiente a un color o longitud de onda diferente. La imagen multispectral resultante está formada por varias capas, y cada una de ellas corresponde a un color (véase la parte inferior de la Figura 3). En la imagen

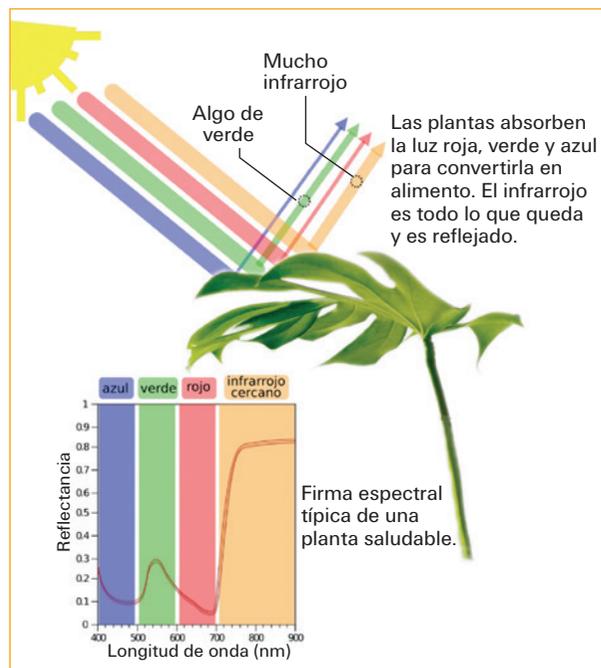


Figura 2. Firma espectral de las plantas verdes.

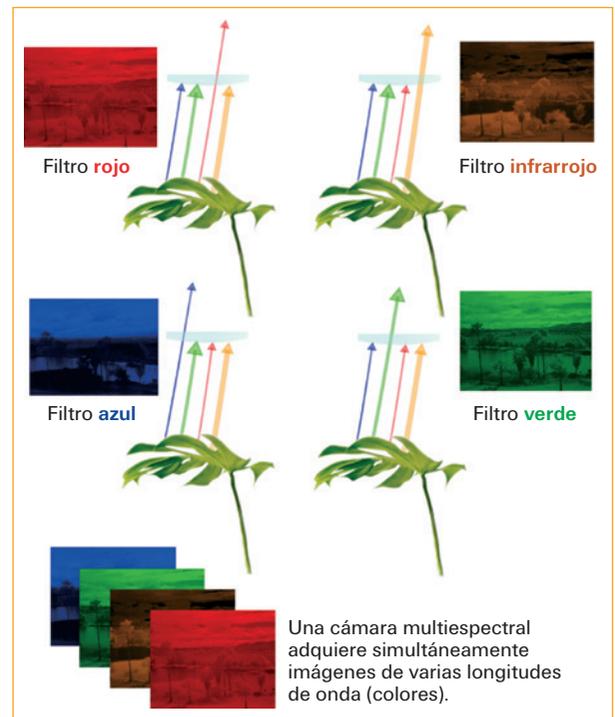


Figura 3. Una cámara multispectral adquiere de manera simultánea imágenes de varias longitudes de onda.

resultante, el valor de cada píxel indica la intensidad de dicho color que tiene el objeto analizado.

■ Índice NDVI

■ Mencionamos que el índice de vegetación es una fórmula matemática que utiliza la intensidad reflejada en varias longitudes de onda para estimar el estado de salud de las plantas. El índice más utilizado es el llamado de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés). La idea de este índice se origina en la firma espectral de las plantas. El NDVI varía de -1 a 1 y se calcula a partir de la luz roja y del infrarrojo cercano reflejado por las plantas. Su principio es sencillo: la vegetación saludable absorbe la mayor parte de la luz roja que recibe y, al mismo tiempo, refleja la mayor parte del infrarrojo. Si la vegetación se encuentra poco saludable o es escasa, se refleja más luz roja y menos luz infrarroja. El NDVI

se calcula para cada píxel de una imagen mediante la siguiente fórmula:

$$Píxel_{NDVI} = \frac{Píxel_{Infrarrojo} - Píxel_{Rojo}}{Píxel_{Infrarrojo} + Píxel_{Rojo}}$$

La Figura 4 presenta un ejemplo de cómo funciona el NDVI. La imagen de la izquierda ilustra una escena que incluye plantas, agua, suelo y nubes. La imagen de la derecha es el correspondiente NDVI. Podemos ver que en las zonas con plantas verdes el NDVI toma valores cercanos a 1; típicamente las plantas saludables tienen un NDVI entre 0.2 y 0.9, mientras que los troncos de los árboles, el suelo y las rocas tienen un NDVI cercano a 0. Las zonas que absorben el infrarrojo, como ciertos tipos de nubes y el agua, toman valores negativos.

En el caso de las imágenes multispectrales satelitales se usa exactamente el mismo principio. La imagen de México en el lado izquierdo de la Figura 5

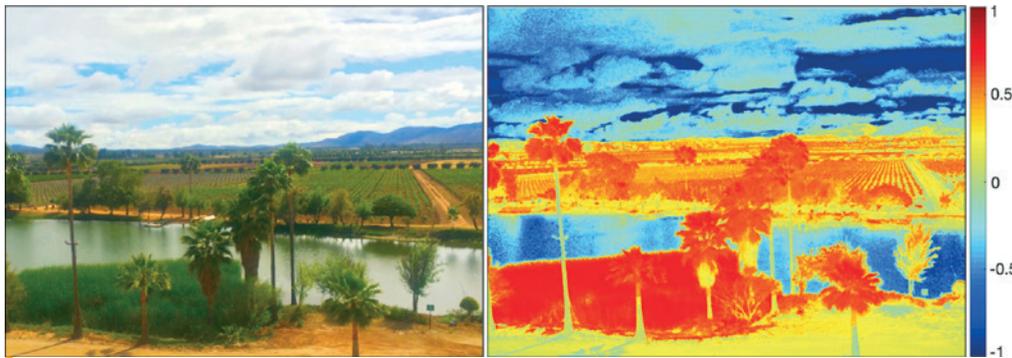


Figura 4. Imagen multispectral de un paisaje.

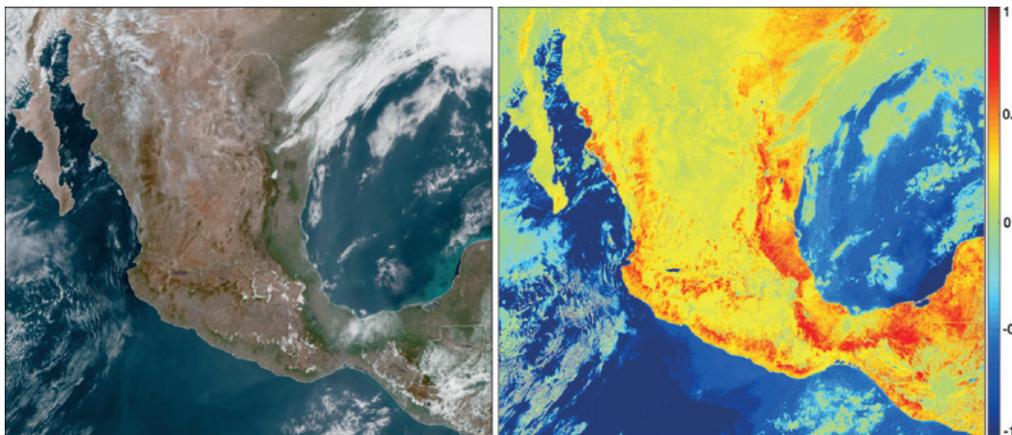
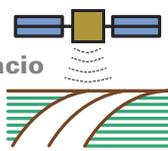


Figura 5. Imagen satelital multispectral. Cortesía del programa GOES de la NOAA.



Recuadro 2. Bandas espectrales

En el contexto de la teledetección, una banda espectral puede ser considerada como una especie de ventana que únicamente permite observar una zona particular del espectro electromagnético. De manera un poco más específica, una banda espectral se refiere a un rango limitado de longitudes de onda dentro del espectro electromagnético que los sensores de una cámara multispectral están configurados para detectar. La Figura 6 muestra un ejemplo en el que el espectro visible y el infrarrojo se dividen en cuatro bandas espectrales que básicamente corresponden a lo que percibimos como los colores azul, verde y rojo, así como una parte del infrarrojo cercano. Idealmente, la respuesta espectral dentro de una banda de interés debe ser 1; es decir, debe dejar pasar toda la luz correspondiente a dicha región del espectro electromagnético. En cambio, debe ser 0 fuera de la banda espectral; es decir, bloquear toda la luz fuera de la zona de interés.

Es muy útil poder observar lo que sucede a través de una banda espectral, ya que nos permite analizar mejor muchos fenómenos sin tener la distracción de lo que sucede en otras bandas espectrales. Por ejemplo, la banda correspondiente al color azul se utiliza para el mapeo de aguas costeras, la discriminación del tipo de suelo y la clasificación forestal. La banda correspondiente al verde permite clasificar distintos tipos de vegetación, así como identificar características de objetos construidos por el ser humano, como edificios o carreteras. La banda correspondiente al rojo permite estimar la salud de las plantas, así como identificarlas; también contribuye a identificar algunas características de los objetos construidos por el ser humano. La banda correspondiente al infrarrojo cercano permite medir la humedad del suelo y es muy útil para la discriminación de agua y tierra.

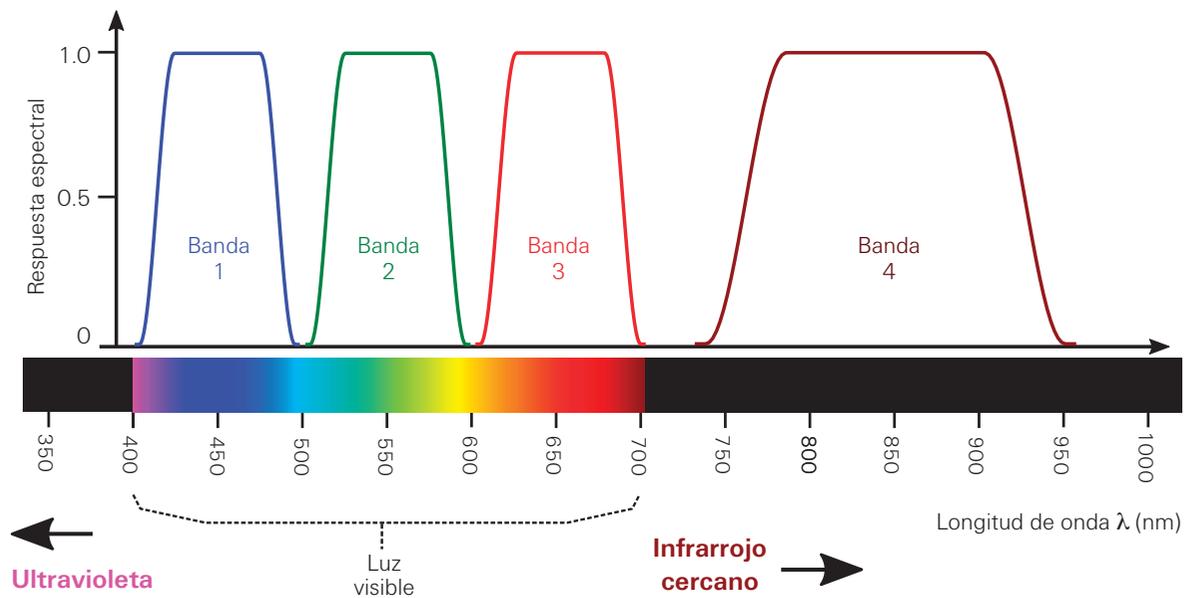


Figura 6. División de cuatro bandas en el espectro visible y el infrarrojo.

fue tomada el 4 de abril de 2019. Podemos ver cómo la zona litoral del Golfo de México y casi toda la zona del Pacífico tienen una abundante vegetación, mientras que la zona del Altiplano norte y la Península de Baja California presentan mucho menor densidad de plantas.

Como mencionamos, el uso de cámaras multispectrales a bordo de los satélites nos ayuda a estimar la salud de las plantas. Además, existen muchas otras aplicaciones para estos dispositivos; por ejemplo, el mapeo de aguas costeras, la clasificación forestal, la identificación de edificios y zonas urbanas,

la medición de la humedad en el suelo, la predicción de huracanes, etcétera. No obstante, por otra parte, la basura espacial aumenta día con día, por lo que es necesario contar con un protocolo para desorbitar (quitar de su órbita) a los satélites que ya dejaron de funcionar.

Algunos de los avances que se esperan en este tipo de tecnologías serán las cámaras de mayor resolución que permitan distinguir objetos más pequeños. También habrá un incremento en el número de bandas espectrales para generar más datos de utilidad. Actualmente México no cuenta con satélites propios para estos fines; sin embargo, se compran imágenes multiespectrales del territorio nacional a empresas extranjeras que cuentan con sus propios satélites.

Alan A. Calderón Velderrain

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

acalderon@cicese.edu.mx

Miguel A. Alonso Arévalo

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

aalonso@cicese.edu.mx

Enrique A. Hernández Elías

ThumbSat México, S. A. de C. V.

antonio@thumbsat.com



Lecturas recomendadas

ESA (2020), *ESA Kids*. Disponible en: <<https://www.esa.int/kids/es/Aprende>>, consultado el 5 de mayo de 2020.

ESA (2020), *European Space Agency* (canal de YouTube). Disponible en: <<https://www.youtube.com/user/ESA>>, consultado el 5 de mayo de 2020.

NASA (2020), *NASA* (canal de YouTube). Disponible en: <<https://www.youtube.com/user/NASAtlevision>>, consultado el 5 de mayo de 2020.

NASA (2020), *Space Place*. Disponible en: <<https://spaceplace.nasa.gov/sp/>>, consultado el 5 de mayo de 2020.