

# La vegetación vista desde el espacio: la fenología foliar a través de la percepción remota



Gracias al desarrollo y a la utilización de la tecnología satelital para poder percibir o ver desde el espacio, hoy es posible evaluar el patrón fenológico de las comunidades vegetales de diferentes regiones climáticas, entre otras cosas.

Lilia Manzo-Delgado y Jorge A. Meave

## INTRODUCCIÓN

**D**e manera cotidiana observamos que la vegetación muestra un aspecto diferente en cada estación, y que éste se repite de forma casi idéntica año con año. Algunas plantas mantienen sus hojas todo el tiempo y otras las pierden totalmente en alguna temporada; diferentes flores y frutos aparecen en ciertas épocas, con diversas formas y colores, rompiendo la monotonía del verdor y atrayendo a numerosos animales polinizadores y consumidores.

Desde hace mucho, estos fenómenos que se repiten de forma cíclica han llamado la atención no sólo del público en general, sino también de la comunidad científica. Numerosos investigadores han realizado observaciones muy detalladas, en ocasiones durante varios años, para conocer los aspectos ecológicos y evoluti-

vos de la producción de hojas, flores y frutos (conocidos como foliación, floración y fructificación, respectivamente). Estos estudios muestran que los factores biológicos y no biológicos guardan una estrecha relación con la apariencia temporal de la vegetación, y han permitido entender mejor las adaptaciones de las plantas a su ambiente, las relaciones entre plantas y animales, la dinámica del ecosistema y el aprovechamiento de los recursos vegetales.

En la actualidad existe un gran interés por conocer los patrones de cambio a través del tiempo en el follaje de la vegetación, en sistemas ecológicos tan diferentes como los bosques tropicales, los pastizales templados y los matorrales desérticos (Williams-Linera y Meave, 2001). Sin embargo, en la época actual un proyecto de tales dimensiones requiere del apoyo de herramientas tecnológicas más poderosas, como la percepción remota y las imágenes de satélite, que permiten visualizar el dosel que forman las hojas de la cubierta vegetal desde arriba (desde un avión o una plataforma espacial) y en forma repetida, sin necesidad de ir al campo ni efectuar mediciones individuales. Actualmente se encuentran en órbita un buen número de sa-

télites que ofrecen una gama de productos para observar la vegetación desde el espacio. Entre ellos, las imágenes meteorológicas del Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR), proporcionadas diariamente por los satélites de la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera del Gobierno de los Estados Unidos (NOAA), están consideradas como una herramienta única para evaluar, comprender y predecir la dinámica foliar (del follaje) a escala global, regional y local (Duchemin y colaboradores, 1999).

Aquí mostraremos un panorama general del potencial que ofrece la percepción remota para estudiar la fenología a gran escala, incluyendo sus aspectos teóricos, avances, aplicaciones y las perspectivas de esta herramienta tecnológica para el siglo XXI.

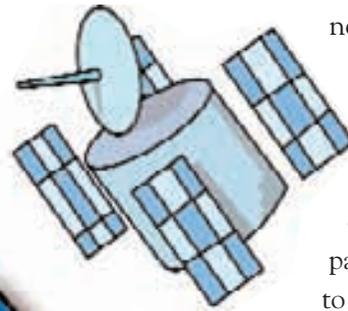
### ¿QUÉ ES LA FENOLOGÍA?

Los cambios estacionales de la vegetación han llamado la atención del ser humano desde tiempos prehistóricos, cuando funcionaban como indicadores de las variaciones del tiempo y de los sistemas naturales de los que dependía su vida. Con el desarrollo de las grandes civilizaciones se consolidó la observación de los cambios en la naturaleza; por ejemplo, en la antigua China, varios siglos antes de nuestra era, esta práctica ya permitía la adecuada planeación de las actividades agrícolas.

A partir del desarrollo formal de las ciencias biológicas, el estudio de la periodicidad de los eventos biológicos cíclicos, tanto de la vegetación como de los animales, dio origen a la disciplina denominada fenología. Dicho término, aparentemente usado por primera vez por el botánico belga Charles Morren en 1853, se deriva de los vocablos griegos *phaino* (aparecer o mostrar) y *logos* (estudio o tratado). En la actualidad el significado del término fenología se ha extendido, ya que se utiliza ampliamente para referirse al comportamiento temporal mismo; de ese modo, es común hablar de la fenología foliar de una comunidad tropical, la fenología reproductiva de una especie, etcétera.

En este contexto, la fenología de la vegetación estudia la temporalidad de las fases de foliación, floración y fructificación, con relación a los cambios estacionales bióticos (organismos herbívoros, polinizadores y frugívoros, comedores de fruta)

y abióticos (temperatura, precipitación pluvial, duración del día, cantidad de radiación solar, entre otros). Aunque cada fase se identifica por separado, hay una constante interacción entre ellas, y de hecho pueden ocurrir simultáneamente. La secuencia de las fases foliar y reproductiva (floración y fructificación) establece patrones fenológicos en los distintos niveles de organización: individuos, poblaciones, comunidades o ecosistemas. El patrón fenológico, visto como un todo, representa una serie de adaptaciones de las plantas que les permiten persistir y reproducirse en su hábitat.



### SIGNIFICADO ECOLÓGICO DE LA FENOLOGÍA FOLIAR

Los estudios fenológicos han puesto más énfasis en la fenología reproductiva, dejando en un plano relativamente secundario a la fenología foliar. Quizá esto se deba, al menos en parte, a una opinión generalizada de que la floración y la fructificación tienen implicaciones ecológicas y evolutivas más interesantes. No obstante, una de las adaptaciones fenológicas que más ha llamado la atención es la periodicidad del follaje, que es extremadamente variable en cada nivel de organización. En términos generales, se ha establecido que los

Una de las adaptaciones fenológicas que más ha llamado la atención es la periodicidad del follaje

cambios del follaje se deben a las variaciones estacionales de precipitación o de temperatura, dependiendo de la ubicación geográfica. Por ejemplo, en las regiones tropicales con periodos de lluvias y sequía bien marcados, la producción foliar máxima se presenta en la época lluviosa, y la caída máxima del follaje coincide con la época seca. En contraste, en las regiones templadas el patrón foliar está regulado principalmente por la estacionalidad de la temperatura: la producción foliar máxima se alcanza en la época más cálida y la caída del follaje ocurre en la temporada fría. A pesar de estos principios generales, se ha demostrado que la ritmicidad foliar también está relacionada con la disponibilidad de agua en el suelo, el fotoperiodo (relación de la duración de las horas de luz y oscuridad en un sitio y una fecha determinados) y la radiación solar, especialmente en las regiones tropicales, donde existe una gran diversidad no sólo de especies sino también de procesos biológicos.

Los cambios periódicos del follaje involucran una serie de procesos metabólicos, como la fotosíntesis y la transpiración, indispensables en el crecimiento y la reproducción de las plantas. Dichos procesos son de gran relevancia para mantener la vida del planeta, porque suministran enormes cantidades de oxígeno a la atmósfera, a la vez que mantienen una estrecha relación con los procesos biogeoquímicos del ecosistema y con las actividades de numerosos herbívoros. Por ejemplo, la caída del follaje controla la transferencia de nutrientes al suelo, incluyendo la formación de mantillo y materia orgánica. La edad de las hojas es un factor importante para la alimentación de los herbívoros, quienes en general prefieren el follaje nuevo.

La descripción de la gran diversidad de patrones foliares se ha visto entorpecida por la dificultad para realizar mediciones en campo. En primer lugar, se requiere de frecuentes visitas al campo para poder evaluar oportunamente el estado fenológico de un conjunto de in-

dividuos seleccionados y cuidadosamente marcados para su seguimiento en el tiempo. Además, las técnicas tradicionales se basan en el uso de binoculares o trampas de hojas, y en el establecimiento de criterios muy particulares para evaluar los estadios foliares. Por ejemplo, algunos métodos consisten en estimar los porcentajes aproximados de hojas jóvenes, maduras y seniles, permitiendo una interpretación rápida. Otros se limitan a registrar la ausencia o presencia de las estructuras, en cuyo caso no se tienen suficientes elementos para conocer la transición de un estadio a otro. Un estudio detallado requiere de un conteo directo, marcando las hojas nuevas en cada censo, midiendo la superficie foliar total o utilizando trampas para calcular la producción de hojas caídas. ¿Cómo hacer esto con una comunidad vegetal completa que cubre hectáreas o kilómetros cuadrados? ¡Imposible!

## PERCEPCIÓN REMOTA

La percepción remota reúne varias técnicas que permiten captar imágenes (o fotografías aéreas) e identificar los materiales de la superficie terrestre, así como estudiar los procesos que ocurren en ella. El elemento común es que toma como base la radiación electromagnética procedente de la misma superficie. Dicha radiación incluye tanto la energía emitida por la propia superficie como la energía solar reflejada. En la región óptica del espectro, el llamado espectro solar (ondas con longitud de 0.4 – 3.0 micrómetros; un micrómetro es la milésima parte de un milímetro), la radiación procedente de la superficie es la radiación solar reflejada. En la Figura 1 se aprecia que, en general, cuando la radiación solar incide sobre un material, una parte se refleja y el resto se propaga en su interior; allí, una porción es absorbida y otra sufre un proceso de dispersión, de tal manera que cierta cantidad emerge nuevamente del material, sumándose a la radiación reflejada. La suma de estas dos contribuciones constituye la radiación reflejada total, y junto con la *irradiancia* (total de energía que incide sobre una superficie en un tiempo determinado) definen la *reflectividad* del material en diferentes longitudes de onda.

La reflectividad espectral está íntimamente relacionada con la naturaleza física y química del material, aunque también puede ser modificada por la acción de factores externos como el ángulo de observación, la iluminación y las condiciones atmosféricas. La dependencia de la reflectividad con relación a la longitud de onda es lo que hace posible el reconocimiento de los materiales en una imagen de satélite (Gilbert y colabora-

dores, 1997). La percepción remota utiliza las bandas de la región óptica del espectro incluyendo las regiones del visible (azul, entre 0.4 y 0.5 micrómetros; verde, entre 0.5 y 0.6 micrómetros; y rojo, entre 0.6 y 0.7 micrómetros), la del infrarrojo (que se subdivide en cercano, con longitud de onda entre 0.7 y 1.3 micrómetros; medio, entre 1.3 y 8 micrómetros; y térmico, de 8 a 14 micrómetros), y de las microondas (con longitud de onda a partir de 0.1 centímetros).

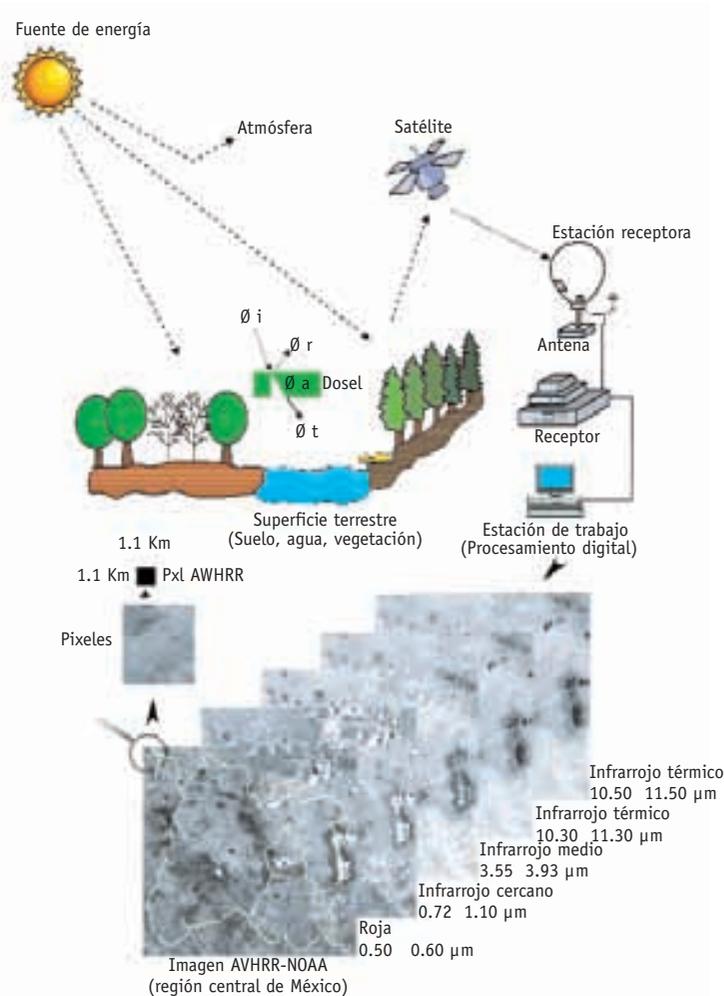
La energía que reflejan los materiales terrestres es captada por instrumentos ópticos muy sofisticados, denominados sensores, que van a bordo de los satélites. El sensor detecta diferentes intervalos de longitudes de onda. Por ello, las imágenes se componen de varias bandas y son multiespectrales. Los satélites describen una órbita polar o estacional que les permite observar una misma zona de la Tierra en repetidas ocasiones, cuyo ciclo puede ser muy corto (horas) o muy amplio (días).

Las imágenes de satélite están compuestas por una malla de números. Cada una de sus células recibe el nombre de *pixel*, cuyo valor (medido en *bits*) representa el promedio de la reflectividad espectral de la superficie en diferentes longitudes de onda. El tamaño de la superficie terrestre que se registra en un pixel varía entre 10 y 1000 metros por lado, según las características del sensor y la elevación del satélite.

De esta manera, una imagen puede ser concebida como una representación pictórica de la superficie terrestre que se caracteriza por tener diferentes resoluciones: espacial (tamaño del pixel), espectral (bandas espectrales), temporal (ciclo de captación) y radiométrica (bits, equivalentes a niveles de energía). Las características de una imagen deben ser consideradas antes de iniciar cualquier investigación, con el propósito de seleccionar aquellas que permitan un mejor análisis del fenómeno. Sin embargo, también es necesario conocer al menos algunos aspectos del comportamiento espectral del objeto en estudio.

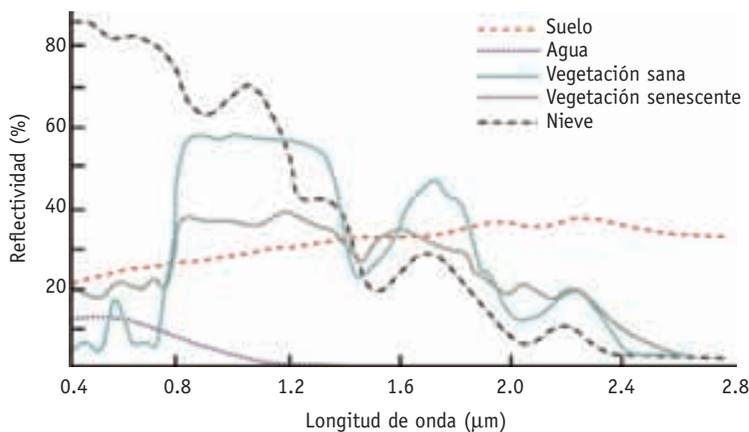
#### COMPORTAMIENTO ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN

A partir de mediciones realizadas en condiciones de laboratorio se han obtenido las curvas espectrales típicas para las



**Figura 1.** Captación de una imagen de satélite. El proceso incluye una fuente de energía (sol). La energía que incide ( $\theta_i$ ) sobre la superficie terrestre (suelo, agua, vegetación) es reflejada ( $\theta_r$ ), absorbida ( $\theta_a$ ) y transmitida ( $\theta_t$ ) en diferentes longitudes de onda. La energía reflejada es captada por el sensor del satélite. La información es enviada a una estación receptora donde se corrige y procesa para obtener una imagen en diferentes bandas del espectro óptico (visibles e infrarrojos).

La energía que reflejan los materiales terrestres es captada por instrumentos ópticos muy sofisticados, denominados sensores



**Figura 2.** Curvas espectrales típicas de distintas cubiertas. Modificada de Chuvieco (2000).

La vegetación presenta un comportamiento espectral muy particular, que está determinado en gran parte por las hojas que forman el dosel

principales cubiertas: suelo, agua, vegetación y nieve (Figura 2). La vegetación presenta un comportamiento espectral muy particular, que está determinado en gran parte por las hojas que forman el dosel, en función de su estado fenológico, contenido de humedad y densidad de cobertura.

La Figura 3 muestra el comportamiento espectral de la vegetación cuando se encuentra en estado óptimo de crecimiento y sin problemas de estrés, es decir, que está vigorosa y sana. Quizá la característica más sobresaliente es que en la región del visible (0.4 a 0.7 micrómetros) su reflectividad es baja, con un

máximo relativo en la porción verde del espectro (0.55 micrómetros). Por el contrario, en el infrarrojo cercano (0.7 a 1.3 micrómetros) presenta una reflectividad elevada, y ésta sólo se reduce en el infrarrojo medio (1.3 a 2.6 micrómetros). La baja reflectividad en el espectro visible se debe a la absorción energética de los pigmentos fotosintéticos que se encuentran en los cloroplastos: clorofilas, xantofilas y carotenos. Sin embargo, el efecto absorbente de los pigmentos es menor en la región del verde, ocasionando un pico relativo que le da el

color a la vegetación. La elevada reflectividad en la región del infrarrojo cercano se debe a la estructura del mesófilo (el tejido interno de la hoja), que difunde y dispersa la energía, mientras que las variaciones en la región del infrarrojo medio son resultado del efecto absorbente del agua (Chuvieco, 2000).

El comportamiento espectral de la vegetación varía en función de los cambios fenológicos del follaje. Esto permite distinguir de entrada dos comportamientos: uno en la fase de crecimiento (desarrollo óptimo o vigoroso) y otro en la fase de senescencia (vegetación seca; figura 2). Durante el periodo de crecimiento, la concentración de clorofila aumenta rápidamente, al igual que los espacios intercelulares del mesófilo y el contenido de agua, provocando una menor reflectividad en la región del visible y mayor en la porción del infrarrojo. Por el contrario, en las etapas de senescencia y caída del follaje, la actividad fotosintética disminuye y el agua se pierde poco a poco, ocasionando que la reflectividad aumente en la porción del visible y disminuya en la del infrarrojo.

Las propiedades estructurales y fisiológicas de las hojas, tales como su forma, tamaño, grosor, contenido de pigmentos fotosintéticos y de agua, juegan un papel importante en el comportamiento espectral de la vegetación. Por ejemplo, las hojas

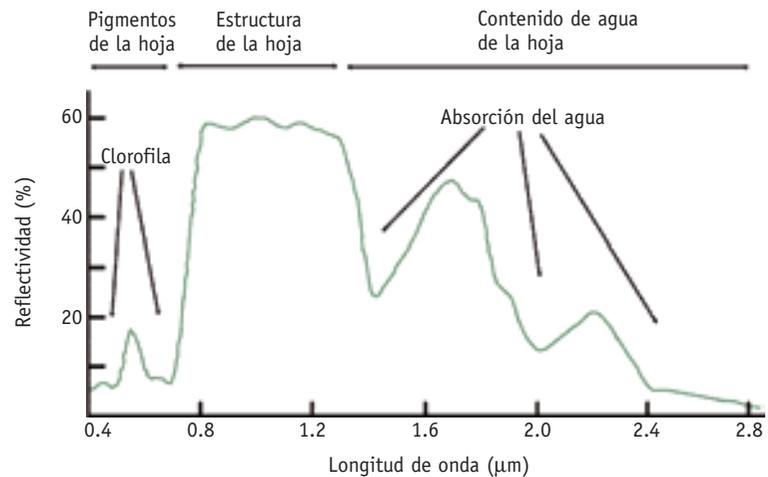
finas reflejan más energía que las hojas gruesas; las hojas aciculares (en forma de aguja) reflejan poca energía, y las plantas de tallo suculento reflejan mucha.

## PERCEPCIÓN REMOTA Y FENOLOGÍA FOLIAR

A partir de la década de los setenta del siglo pasado se comenzó a reconocer el enorme potencial de los satélites para proporcionar información sobre los cambios fenológicos de los cultivos y de las comunidades vegetales. Uno de los primeros esfuerzos consistió en identificar el inicio (“ola verde”) y el final (“ola café”) del periodo de crecimiento de los pastizales de las grandes planicies centrales de Estados Unidos, utilizando las imágenes Landsat-MSS (Barredor Multi-Espectral), que tienen píxeles de 79 metros de lado y frecuencia de captación de 18 días, para la obtención de un índice de vegetación (NDVI, o Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), generado a partir de la reflectividad de las bandas roja e infrarroja. Más adelante, los estudios fenológicos continuaron utilizando las imágenes Landsat-MSS además de las del TM (Mapeador Temático). Éstas últimas tienen píxeles de 30 metros por lado y frecuencia de captación de 16 días. Sin embargo, la presencia de nubes en ciertas épocas del año impedía obtener una secuencia continua de los cambios fenológicos. Por ello, se consideró que el ciclo repetitivo de 18 días para los satélites Landsat 1, 2 y 3 (imágenes MSS), o de 16 días para Landsat 4 y 5 (imágenes TM y MSS), es una limitante para analizar con suficiente precisión los eventos fenológicos. Como alternativa, a mediados de la década de los ochenta se decidió utilizar las imágenes meteorológicas AVHRR-NOAA, que tienen píxeles que cubren áreas de 1.1 kilómetros por lado y frecuencia de captación diaria, logrando con ello un monitoreo continuo sin necesidad de esperar 18 ó 16 días para obtener las imágenes Landsat. Esta opción generó resultados bastante satisfactorios. Desde entonces se han seguido utilizando dichas imágenes y actualmente se consideran las más adecuadas para monitorear los eventos fenológicos a gran escala (Reed y colaboradores, 1994).

La preferencia actual de los investigadores por las imágenes AVHRR-NOAA se debe, además de su cobertura global diaria, a que éstas presentan cinco canales espectrales, uno en el visible

A mediados de la década de los ochenta se decidió utilizar las imágenes meteorológicas AVHRR-NOAA, que tienen píxeles que cubren áreas de 1.1 kilómetros por lado y frecuencia de captación diaria



**Figura 3.** Comportamiento espectral de la vegetación. En las longitudes de onda del espectro visible (0.4 a 0.7 micrómetros, mm) la vegetación presenta una reflectividad baja debido al efecto absorbente de los pigmentos fotosintéticos. En la región espectral del infrarrojo cercano (0.7 a 1.3 micrómetros), la reflectividad es elevada porque el mesófilo difunde y dispersa la energía. En la región espectral del infrarrojo medio (1.3 a 2.6 micrómetros), la reflectividad es variable debido al efecto absorbente del agua. Tomada de Chuvieco (2000).

y cuatro en el infrarrojo, que permiten conocer las características de la vegetación relacionadas con la biomasa foliar, la actividad fotosintética y el contenido de agua. La alta resolución temporal facilita la selección de imágenes en las que no hay nubes (Ehrlich y colaboradores, 1994). La baja resolución espacial (píxeles de 1.1 kilómetros) permite captar superficies de 3 mil kilómetros por lado, la cual es suficiente para incluir en una sola imagen a todo un país como México. Una ventaja adicional es que el satélite envía las imágenes a una estación receptora inmediatamente después de que termina la captación. Esto agiliza el procesamiento de la información en tiempo real, con un costo relativamente bajo, y facilita la creación de un banco de información. Varias etapas de este proceso se sintetizan gráficamente en la Figura 1.

### EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN NDVI

El índice de vegetación NDVI es un parámetro que se obtiene a partir de los valores de reflectividad de las bandas espectrales del rojo y el infrarrojo cercano, cuyo intervalo de variación, al estar normalizado, queda comprendido entre -1 y +1:

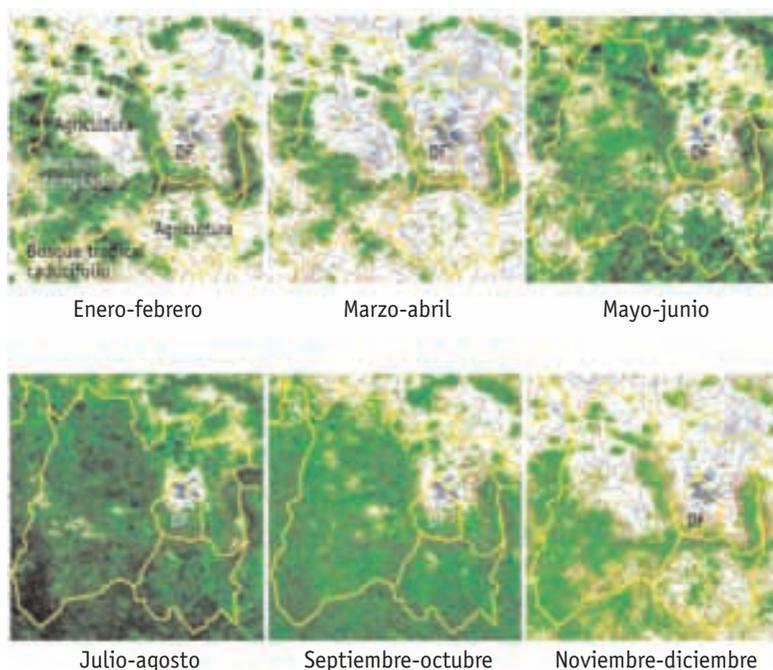
$$\text{NDVI} = (\text{infrarrojo cercano} - \text{rojo}) / (\text{infrarrojo cercano} + \text{rojo})$$

Las áreas con vegetación densa presentan valores positivos de NDVI, mientras que las nubes, los cuerpos de agua y la nieve tienden a registrar valores negativos. Las rocas y el suelo desnudo presentan valores cercanos a cero. Si bien existen otros índices de vegetación, el NDVI ha sido por mucho el más utilizado en las últimas décadas (Gilabert y colaboradores, 1997).

Cuando las interferencias atmosféricas son muy fuertes (nubes, vapor de agua,

aerosol, ángulo solar, etcétera) el NDVI registra valores muy bajos. Para evitar dichos efectos se ha sugerido construir “compuestos” de NDVI. Los “compuestos” consisten en agrupar una serie de imágenes y seleccionar todos los píxeles que hayan alcanzado el máximo valor durante un periodo determinado (que puede ser de días, semanas, etc.). El resultado de este laborioso procedimiento es una imagen con presencia mínima de nubes; su repetición sistemática genera una secuencia de compuestos denominada “serie de tiempo”, que facilitan el análisis multitemporal de las imágenes (Figura 4). Las series de más de un año permiten conocer el comportamiento fenológico estacional entre años.

La interpretación de las series de tiempo del NDVI puede ser visual o por medio de la construcción de gráficas que



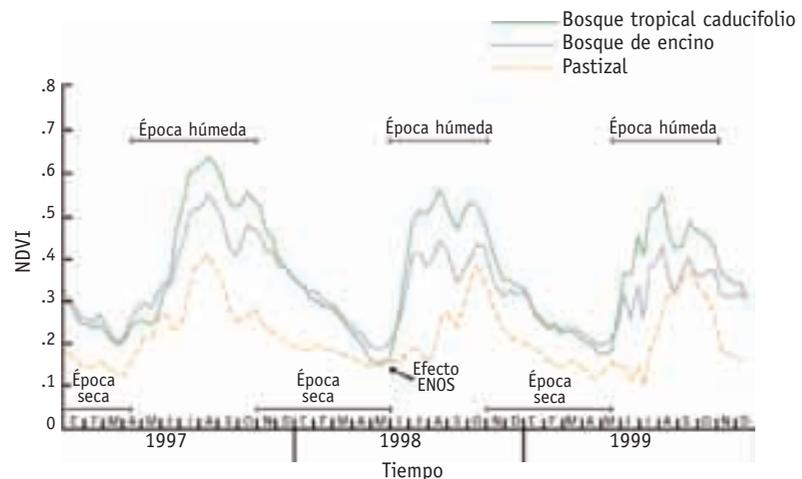
**Figura 4.** Serie de “compuestos” bimestrales de NDVI-AVRR para 1997 de la región central de México (estados de Morelos, México y Distrito Federal). Las líneas en color café indican las curvas de nivel sobre el nivel del mar. Esto permite identificar las elevaciones montañosas que rodean al Distrito Federal, como la Sierra Nevada al este, la Sierra Chichinautzin al sur, la Sierra de las Cruces al oeste, o el Nevado de Toluca, al oeste de la misma ciudad. Tal referencia permite observar que durante el primero y segundo bimestres, los bosques templados de las elevaciones montañosas mantienen su biomasa foliar durante todo el año y por tanto el NDVI se presenta con tonos en color verde. A partir del tercer bimestre, cuando inicia la temporada lluviosa, los bosques tropicales y el área agrícola aumentan gradualmente los valores de NDVI en respuesta al incremento de la actividad fotosintética y la biomasa foliar. Durante el cuarto y quinto bimestres el NDVI alcanza sus valores más altos. A partir del sexto bimestre, la ausencia de lluvias ocasiona la disminución del NDVI.

muestran el comportamiento del NDVI a través del tiempo. La evaluación visual se basa en las diferencias de color. Los colores más brillantes están asociados a una mayor actividad fotosintética y biomasa foliar (fase de crecimiento y madurez), en tanto que los oscuros están relacionados con una baja actividad fotosintética y menor densidad foliar (fase de senescencia y caída del follaje). Las gráficas del NDVI facilitan el análisis cuantitativo de los cambios fenológicos y permiten obtener varios parámetros: el inicio de la etapa de crecimiento (emergencia de brotes foliares), las tasas de crecimiento y senescencia, los picos de producción máxima y mínima, y la duración de la etapa de crecimiento, entre otros. La pendiente positiva de la curva, es decir, su fase ascendente, está relacionada con la fase de crecimiento y producción de biomasa, mientras que la pendiente negativa o descendente representa las fases de maduración, senescencia y caída del follaje (Figura 5). La amplitud de la curva está relacionada con el índice de área foliar (superficie total del follaje por unidad de superficie del terreno) y la biomasa.

### EL NDVI Y LA FENOLOGÍA FOLIAR

La construcción de las series de tiempo del NDVI, generadas a partir de las imágenes AVHRR-NOAA (en adelante NDVI-AVHRR) ha revelado los patrones fenológicos de varias comunidades vegetales. Es interesante que, en general, éstos muestran una coherencia espacial y temporal con las observaciones fenológicas clásicas.

Justice y colaboradores (1985) fueron pioneros en la evaluación de la dinámica estacional de la vegetación a nivel global, regional y local usando series de tiempo NDVI-AVHRR. Dicho análisis se logró remuestreando las imágenes a diferentes escalas (reagrupación de píxeles). Su reporte incluye imágenes mundiales para cada estación del año y numerosas series de tiempo que muestran el patrón fenológico de diversas comunidades vegetales: desérticas, estepas, sabanas, bosques tropicales y agricultura, las cuales se distribuyen en distintas regiones continentales. Aunque su análisis fue básicamente cualitativo, resaltó el potencial de las imágenes AVHRR-NOAA para estudiar el

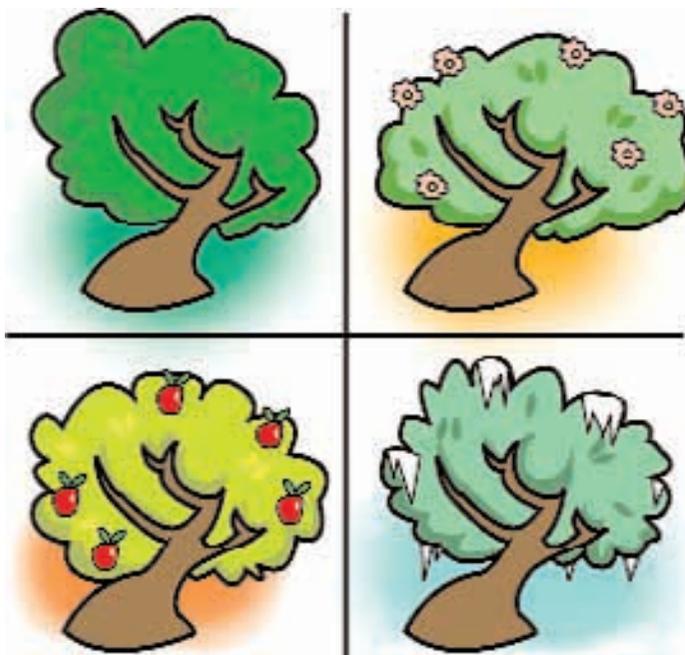


**Figura 5.** Patrones fenológicos de diferentes comunidades vegetales de la región central de México, obtenidos a partir de las series de tiempo NDVI-AVHRR para el período 1997 a 1998. El comportamiento permite comparar la intensidad de los cambios fenológicos en las épocas seca y húmeda en distintos años.

Justice y colaboradores (1985) fueron pioneros en la evaluación de la dinámica estacional de la vegetación a nivel global, regional y local

comportamiento fenológico a gran escala. Investigaciones posteriores han puesto mayor énfasis en los aspectos cuantitativos, incluyendo muestreos en campo para medir el índice del área foliar, incrementando el periodo de observación hasta por un periodo de diez años, y desarrollando varios procedimientos matemáticos para la obtención de distintos parámetros que permiten evaluar mejor los cambios fenológicos estacionales e interanuales.

Las regiones que más se han estudiado con este propósito son Norteamérica (especialmen-



Los patrones fenológicos observados en los diferentes ecosistemas forestales son tan diversos como los bosques mismos

te en los Estados Unidos), Asia, India, África, la península Ibérica, Brasil y Francia. Esto se debe muy probablemente a que en ellas existen comunidades vegetales de gran extensión que pueden ser identificadas fácilmente en las imágenes AVHRR-NOAA. Otro incentivo importante es la posibilidad de llevar a cabo estudios donde es muy difícil realizar exploraciones en campo, por ejemplo en la región del Amazonas, en Brasil.

A escala global, las series de tiempo NDVI-AVHRR muestran que el comportamiento fenológico guarda una estrecha relación con las variaciones estacionales de temperatura y precipitación, dependiendo de su ubicación geográfica. En las regiones tropicales del hemisferio norte la fase de crecimiento se inicia de marzo a mayo, mientras que en el hemisferio sur, comienza al final del año, justo al inicio de la primavera austral. En el región del Mediterráneo (sur de España y norte de África), la fase de crecimiento se inicia en el otoño (septiembre) y se extiende hasta la primavera, cuando se alcanza el máximo desarrollo foliar.

A escala regional, las series de tiempo NDVI-AVHRR han logrado describir y caracterizar el patrón fenológico de varios tipos de comunidades, entre los que destacan los pastizales, los matorrales y los bosques estacionales templados y tropicales.

Los pastizales de diversas regiones muestran un patrón fenológico con valores de NDVI muy bajos en la época seca y con incrementos variables en la época lluviosa, aunque generalmente la diferencia entre los valores mínimos y máximos es pequeña. La variabilidad está relacionada con la intensidad y duración

del periodo de precipitación: cuando la vegetación está más seca el NDVI registra valores bajos (Figura 5). Algo semejante ocurre con los matorrales desérticos, aunque los patrones fenológicos registrados en ellos son mucho más variables debido a la frecuencia tan irregular de las lluvias, lo que hace que los periodos de producción y senescencia foliar sean muy rápidos y poco predecibles.

Los patrones fenológicos observados en los diferentes ecosistemas forestales son tan diversos como los bosques mismos. En los bosques tropicales estacionales, el NDVI presenta valores muy bajos durante la época seca, pero muy altos en la húmeda; este comportamiento se explica fácilmente por la abundancia

de especies caducifolias, es decir, que pierden su follaje en la época desfavorable del año (Figura 5). Por el contrario, el patrón fenológico de los bosques tropicales húmedos se caracteriza por presentar valores del NDVI permanentemente altos, ya que a lo mucho llegan a presentar ligeros incrementos y decrementos a lo largo del año; aquí también la explicación reside en su composición florística, ya que la dominancia corresponde a especies perennifolias (que nunca pierden su follaje), con una amplia diversidad de patrones foliares. Curiosamente, el patrón fenológico general de los bosques templados de hojas anchas se asemeja al de los bosques tropicales estacionales, debido a los fuertes cambios en los valores del NDVI a través del año: estos valores son muy bajos durante el otoño e invierno, aumentan rápidamente en la primavera y alcanzan sus niveles máximos en el verano. Sin embargo, en este caso este comportamiento dinámico está regulado por los cambios de temperatura y no por los de precipitación.

A escala local, los estudios fenológicos han mostrado que la exposición y la latitud son factores importantes que influyen en la duración del ciclo fenológico. Por ejemplo, los bosques templados en el sur de Francia inician su crecimiento foliar treinta y dos días antes que los que se ubican en la parte norte de dicho país (Duchemin y colaboradores, 1999). De manera análoga, las mediciones en campo han señalado que los valores del NDVI mantienen una correlación positiva con los índices de área foliar.

## APLICACIONES Y PERSPECTIVAS

La fenología de la vegetación varía no sólo en función de los cambios estacionales, sino que también responde a eventos climáticos adversos de gran magnitud y que son menos frecuentes, como las sequías ocasionadas en algunas regiones por el fenómeno conocido como El Niño–Oscilación del Sur (ENOS). Estas intensas sequías ocasionan varios problemas de estrés hídrico que repercuten en una disminución aún mayor de los umbrales mínimos del NDVI (Batista y colaboradores, 1997). Este hecho ha quedado registrado en las series de tiempo NDVI-AVHRR que incluyen las sequías del El Niño de 1983, 1987, 1992 y 1998. En la figura 5 se observa el efecto de El Niño durante 1998.

En las últimas décadas, la presencia del El Niño ha favorecido la ocurrencia de incendios forestales de gran dimensión. Con el fin de contribuir a su prevención, los científicos construyen modelos de predicción de incendios, los cuales consideran como

**A escala local, los estudios fenológicos han mostrado que la exposición y la latitud son factores importantes que influyen en la duración del ciclo fenológico**

variables importantes el estado fenológico y la humedad del follaje obtenidas a partir de imágenes AVHRR-NOAA (Illera y colaboradores, 1996). A partir de los graves incendios que afectaron enormes extensiones de bosques en la época seca de 1998, en México se están llevando a cabo proyectos para elaborar un modelo de predicción de incendios forestales que incluye al NDVI entre las variables (Manzo y colaboradores, 2001).

Las investigaciones relacionadas con el cambio climático global han permitido reconocer la variabilidad del inicio de la fase de formación de follaje en distintos años como un indicador importante de los efectos preliminares del calentamiento. El inicio anticipado de la época de crecimiento puede ocasionar modificaciones significativas en la productividad del ecosistema (Schwartz, 1998). En este ámbito la tecnología de percepción remota también comienza a jugar un papel crucial, ya que las predicciones se han apoyado en las series de tiempo NDVI-AVHRR para evaluar la confiabilidad de sus modelos. Aunque estos trabajos se encuentran en una etapa inicial, sin duda próximamente tendrán un mayor desarrollo debido a la creciente preocupación mundial ante los numerosos indicios de un calentamiento global que rebasa la variabilidad climática interanual.

## CONCLUSIONES

A través de este panorama se ha intentado mostrar que las imágenes de satélite AVHRR-

NOAA son una herramienta tecnológica indispensable para estudiar la fenología foliar a gran escala. A través de su uso se puede procesar información de extensas superficies en periodos de trabajo muy cortos y con un esfuerzo mucho menor que el requerido para las observaciones en campo.

La cobertura diaria de las imágenes AVHRR-NOAA permite formar series de tiempo NDVI libres de nubes; a través de ellas se pueden realizar evaluaciones cualitativas y cuantitativas del patrón fenológico de las comunidades vegetales de diferentes regiones climáticas, con resultados que son coherentes con los obtenidos en estudios fenológicos clásicos. Sin embargo, debe reconocerse que este procedimiento todavía enfrenta algunas limitaciones, sobre todo en regiones con nubosidad frecuente, como la estrecha franja alrededor del Ecuador, las elevaciones montañosas cubiertas con nieve, y las regiones desérticas donde las especies vegetales están muy dispersas.

La información proporcionada por las series de tiempo del NDVI-AVHRR-NOAA ha permitido evaluar con eficacia las perturbaciones fenológicas ocasionadas por El Niño, llevando incluso a la construcción de un sistema de reoalimentación, ya que dichas anomalías han sido seleccionadas a su vez como una variable en la construcción de modelos de predicción de incendios forestales. Más aún, dichas series se han considerado como un indicador importante en las evaluaciones del cambio climático global. Ante este panorama, es necesario que en México se impulse el uso de imágenes de satélite AVHRR-NOAA. Para ello, el país ya cuenta con infraestructura instalada, pues en la actualidad existen tres estaciones receptoras, ubicadas una en la Universidad de Colima, otra en la Conabio y una más en el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). En este último, además, está disponible un banco de imágenes desde 1996, que tiene la finalidad de apoyar distintos proyectos de investigación.

## Bibliografía

- Batista, G. T., E. Shimabukuro y W. T. Lawrence (1997), "The long-term monitoring of vegetation cover in the Amazonia region of northern Brazil using NOAA-AVHRR data", *International Journal of Remote Sensing*, 18, 3195-3210.
- Chuvienco, E. (2000), *Fundamentos de Teledetección Espacial*. 3ª ed. Madrid, Ediciones Rialp.
- Duchemin, B., J. Goubier y G. Courier (1999), "Monitoring phenological key stages and cycle duration of temperate deciduous forest ecosystems with NOAA-AVHRR data", *Remote Sensing of Environment*, 67, 68-88.
- Ehrlich, D., J. E. Estes y A. Singh (1994), "Applications of NOAA-AVHRR 1 km for environmental monitoring", *International Journal of Remote Sensing*, 15, 145-161.
- Gilbert, M. A., J. González-Piqueras y J. García-Haro (1997) "Acerca de los índices de vegetación", *Revista de Teledetección*, 8, 35-45.
- Illera, P., A. Fernández y J. A. Delgado (1996), "Temporal evolution of the NDVI as an indicator of forest fire danger", *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1093-1105.
- Justice, C. O., J. R. G. Townshend, B. N. Holben y J. Tucker (1985), "Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data", *International Journal of Remote Sensing*, 6: 1271-1318.
- Manzo D., L., S. Sánchez-Colón, M. E. García, A. Cabrera, G. Gómez y R. Álvarez (2001), "Probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en la región central de México", XII Reunión Nacional de Selva México, 7-9 de noviembre, Puerto Vallarta.
- Reed, B., J. Brown, D. VanderZee, T. R. Loveland, J. W. Merchant y D. O. Ohlen (1994), "Measuring phenological variability from satellite". *Journal of Vegetation Science*, 5, 703-714.
- Schwartz, M. D. (1998), "Green-wave phenology", *Nature*, 349, 839-840.
- Williams-Linera, G. y J. Meave (2001), "Patrones Fenológicos", en M. Guariguata y G. Katan (comps.), *Ecología y Conservación de Bosques Neotropicales*, Cartago, Libro Universitario Regional, pp. 407-432.

---

**Lilia Manzo-Delgado** es candidata a doctora en Ciencias Biológicas y profesora de Ciencias de la Tierra en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Su principal interés en investigación es el comportamiento fenológico de la vegetación y los incendios forestales a través de imágenes de satélite. Es miembro de la Sociedad de Especialistas Latinoamericanos en Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial.  
llmanzo@igiris.igeograf.unam.mx

**Jorge A. Meave** obtuvo el doctorado en la Universidad York (Toronto). Es profesor en el Departamento de Ecología y Recursos Naturales de la Facultad de Ciencias de la UNAM, donde coordina el grupo de Ecología y Diversidad Vegetal. Su investigación se centra en el análisis de patrones de diversidad vegetal en comunidades tropicales y subtropicales y los procesos dinámicos en éstas, incluyendo la fenología. Tiene más de 30 trabajos publicados en revistas y libros. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores y es miembro de varias sociedades científicas nacionales e internacionales. Actualmente es editor del *Boletín de la Sociedad Botánica de México* y editor asociado de *Tropical Ecology*.  
jamdc@hp.fcencias.unam.mx