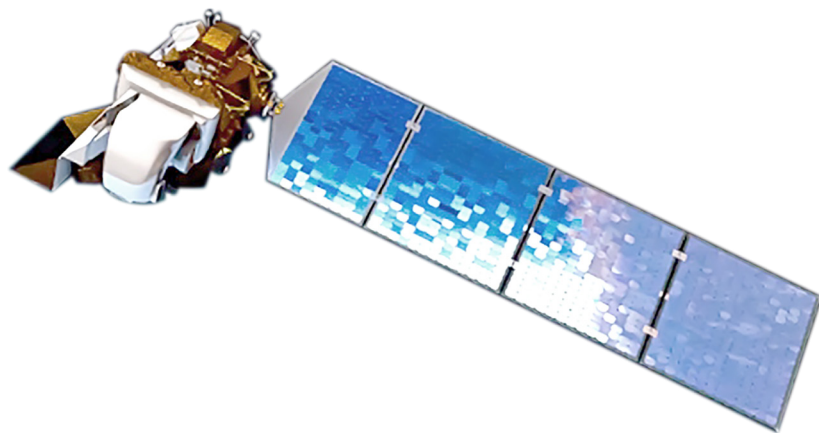
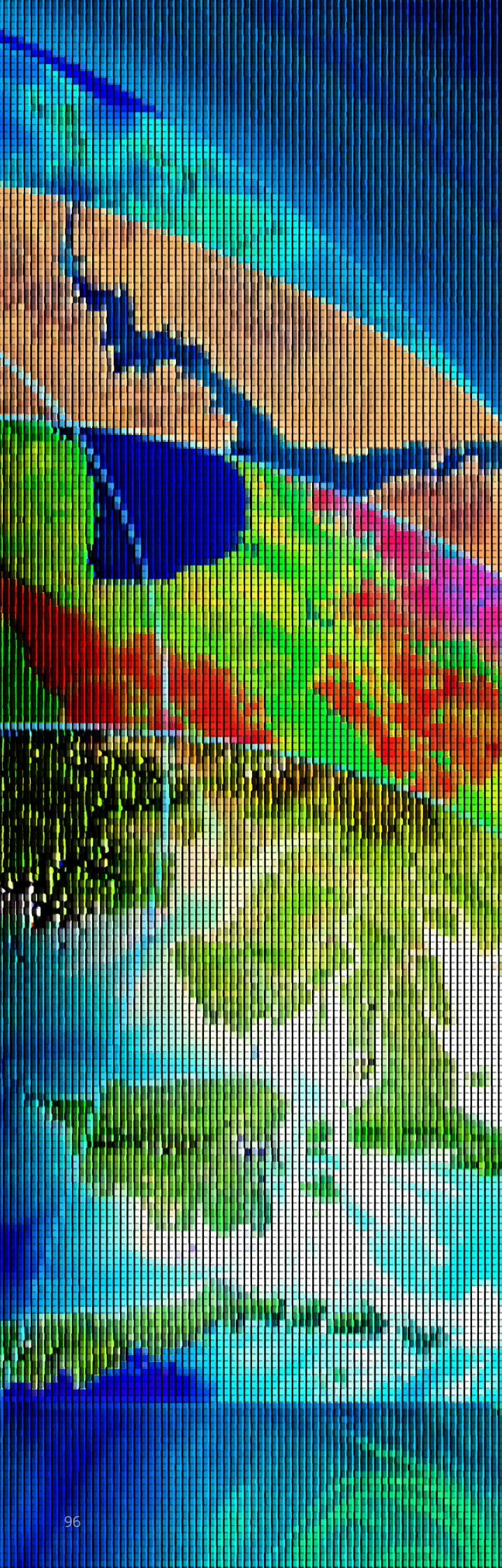




TECNOLOGÍA SATELITAL Y MANGLARES: UNA ALIANZA PARA MITIGAR EL CALENTAMIENTO GLOBAL

/// CYNTHYA MALDONADO MOJICA¹; JORGE
OMAR LÓPEZ MARTÍNEZ^{2,3*}; E. BETZABETH
PALAFOX JUÁREZ^{2,4}; HÉCTOR A. HERNÁNDEZ
ARANA¹.

¹Departamento de Sistemática y Ecología Acuática. El Colegio de la
Frontera Sur – Unidad Chetumal

²Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)

³Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial
(CentroGeo), Mérida, México

⁴Departamento Observación y Estudio de la Tierra, la Atmósfera y el
Océano. El Colegio de la Frontera Sur – Unidad Chetumal

*Autor por correspondencia: lmjorgeomar@gmail.com

RESUMEN

Los manglares, ubicados en zonas costeras tropicales y subtropicales, son ecosistemas clave que no solo proporcionan importantes servicios ambientales, como la protección de costas y la conservación de la biodiversidad, sino que también desempeñan un papel crucial en la mitigación del cambio climático al almacenar grandes cantidades de carbono en su biomasa y en el suelo. No obstante, son altamente vulnerables a la deforestación, la urbanización y otros cambios de uso del suelo; provocando la liberación del carbono almacenado y contribuyendo al calentamiento global. La percepción remota, mediante el uso de sensores remotos como Landsat y Sentinel, resulta fundamental para monitorear estos ecosistemas. Las plataformas como éstas, emplean sensores multispectrales que capturan diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, permitiendo estimar la biomasa y detectar cambios en la extensión de los manglares. Herramientas como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y LIDAR, permiten obtener información detallada sobre la estructura y la densidad del dosel, elementos clave para calcular el carbono almacenado; sin embargo, es necesario complementar las estimaciones obtenidas por teledetección con mediciones en campo, para mejorar la precisión de los cálculos de biomasa. La combinación de ambas metodologías refuerza la capacidad de gestión y conservación de los manglares, contribuyendo significativamente a las estrategias globales para mitigar el cambio climático.

ABSTRACT:

Mangroves in tropical and subtropical coastal areas are critical ecosystems that provide vital environmental services, such as coastal protection and biodiversity conservation. They play a crucial role in mitigating climate change by storing significant amounts of carbon in their biomass and soil. However, mangroves are highly vulnerable to deforestation, urbanization, and other land-use changes, which release stored carbon and contribute to global warming. Remote sensing technologies, such as those offered by platforms like Landsat and Sentinel, are essential for monitoring these ecosystems. These platforms use multispectral sensors that capture different electromagnetic spectrum wavelengths, enabling biomass estimation and detection of changes in mangrove extent. Tools like the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and LIDAR provide detailed information on canopy structure and density, which are key for calculating carbon stocks. To enhance the accuracy of biomass estimates, it is necessary to complement remotely sensed data with field measurements. Combining both methodologies strengthens mangrove management and conservation efforts, contributing significantly to global strategies for mitigating climate change.



Palabras clave: Manglar, Almacenes de carbono, Mitigación del cambio climático, Percepción Remota.

Keywords: Mangrove, Carbon stocks, Climate change mitigation, Remote sensing.



Figura 1. Manglares de Bacalar. Foto por Héctor Abuid Hernández Arana.

La creciente población humana ha impactado severamente los ciclos biogeoquímicos de la tierra acelerando el fenómeno del calentamiento global. Factores como la generación de energía, la pérdida de cobertura forestal y la producción de alimentos, asociados a una creciente población humana demandante de bienes y servicios, son algunas de sus principales causas. Las perspectivas de un cambio de dirección y de magnitud de estos factores son poco alentadoras, lo que tendría que ponernos en estado de alerta ante el riesgo de una crisis climática.

En las últimas cinco décadas, los niveles de CO_2 en la atmósfera han aumentado drásticamente, pasando de 314.6 ppm en 1958 a 425 ppm en 2024. Este incremento en la concentración de CO_2 exacerba el efecto invernadero y eleva la temperatura global. Sus efectos directos son el derretimiento de glaciares, el aumento del nivel medio del mar, la acidificación de los océanos y en general un aumento en la variación del clima. A nivel global, estas alteraciones afectan los procesos de regulación que sustentan la vida, mientras que, localmente, comprometen la salud de los ecosistemas, afectando la seguridad alimentaria y el bienestar humano (FAO, 2016; NASA, 2024; NOAA, 2024).

Ante los riesgos potenciales de una crisis climática se vuelve imprescindible contar con datos e información que permitan tomar acciones, tales como la restauración o, la implementación de medidas de mitigación de impactos sobre ecosistemas clave, como bosques, selvas y humedales. Los sensores remotos son una poderosa herramienta, y complementa las estrategias de monitoreo de cambios espaciales y temporales de los ecosistemas. Un ejemplo de su aplicación ha sido en

el monitoreo de los ecosistemas de manglar, que son ecosistemas de transición entre los sistemas terrestres y acuáticos, y su localización en planicies costeras de inundación ha resultado en fuertes presiones antrópicas para el desarrollo de complejos turísticos.

Esta contribución destaca la importancia de combinar herramientas tecnológicas, como los sensores remotos, para el monitoreo de ecosistemas logísticamente difíciles de estudiar con herramientas tradicionales de observación y experimentación en campo. Esta combinación de herramientas provee un valor agregado para estimar extensión y cobertura de los manglares, así como su dinámica asociada a los cambios de uso de suelos. La información obtenida de la observación espacial y temporal de cambios en la cobertura y extensión de los manglares, por sensores remotos, permite proponer e implementar acciones para la restauración o mitigación de ciertos impactos, particularmente los derivados de la actividad humana.

¿MANGLARES?

La percepción de la sociedad hacia los ecosistemas de 'manglar' generalmente no es positiva. Se perciben como áreas "insalubres", fangosas y malolientes, con fauna no muy carismática (pero importante), como serpientes, cocodrilos y mosquitos. Es evidente el desconocimiento de la sociedad hacia el valor ecológico, y por extensión, el valor económico de sus funciones como ecosistema.

Entonces, desde una perspectiva ecológica, ¿qué son los manglares? De acuerdo con Velázquez-Salazar et al. (2021), los manglares son ecosistemas costeros

únicos, formados por árboles, arbustos y plantas conocidas como mangles, adaptadas a condiciones de inundación en ambientes que van desde salinos hasta de agua dulce. Estos ecosistemas se localizan en más de 120 países, a lo largo de las zonas costeras tropicales y subtropicales del mundo. Se encuentran en zonas de transición entre el mar y la tierra, desembocaduras de ríos, lagunas costeras y esteros, donde se mezclan aguas saladas del mar con aguas dulces de ríos, y fuentes subterráneas, donde las temperaturas cálidas y las condiciones de inundación permiten su desarrollo (Figura 1).

En el mundo, existen alrededor de 70 especies de manglar (Spalding et al. 2010; Davidson y Finlayson 2019). México contribuye con el 6.7% de la superficie global de manglares en el mundo, siendo el cuarto país con mayor extensión de este valioso ecosistema. La mayor parte de este porcentaje se localiza en la Península de Yucatán (60%), aunque existen manglares en las costas de 14 estados del país (desde Baja California hasta Chiapas en el Pacífico, así como a lo largo del Golfo de México y el Mar Caribe). Las especies dominantes o de mayor distribución son el mangle rojo (*Rhizophora mangle*), el mangle blanco (*Laguncularia racemosa*), el mangle negro (*Avicennia germinans*) y el mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*) (Figura 2). Sin embargo, existen dos especies más *Avicennia bicolor* y *Rhizophora harrisonii*, que solo se distribuyen en una pequeña región de las costas de Chiapas (Velázquez-Salazar et al., 2020; Rodríguez-Zúñiga et al., 2013).

Es interesante que cada una de estas especies posee características que les permiten colonizar y establecerse en zonas con condiciones ambientales específicas. Por ejemplo, las especies del género *Avicennia spp* están adaptadas para expulsar el exceso de sal a través de sus hojas, formando diminutos cristales en su superficie, y no son capaces de resistir largos períodos de inundación. Mientras que las especies del género *Laguncularia spp*, acumulan la sal en las hojas viejas que están a punto de caer, y son capaces de resistir inundaciones prolongadas. Por otro lado, las del género *Rhizophora spp* han desarrollado raíces en forma de "zancos" que les permiten establecerse en áreas con mucho oleaje o muy fangosas. Por último, las especies del género *Conocarpus spp* habitan zonas más elevadas, con suelo más firme, y es frecuente encontrarlas en la interfaz con otros tipos de vegetación (Rodríguez-Zúñiga et al., 2013; Davidson y Finlayson, 2019).

La importancia de los manglares para la humanidad es superlativa, debido a su complejidad y a sus funciones ecosistémicas. Por un lado, los manglares

actúan como barreras naturales, disminuyendo la energía de las olas y protegiendo las costas de la erosión, huracanes y tsunamis. También almacenan grandes volúmenes de agua, disminuyendo el impacto de las inundaciones en zonas costeras y áreas bajas, y contribuyen al abastecimiento de los mantos freáticos. También, son espacios idóneos para la reproducción y el crecimiento de una gran diversidad de especies, tales como peces, crustáceos y aves, muchas de ellas de importancia comercial y fuentes de alimentación. Además, ofrecen áreas para actividades recreativas, turísticas y educativas, entre otros valiosos servicios ecosistémicos (Agráz-Hernández et al., 2006; Russi et al., 2013).

LOS MANGLALES EN LA MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Los manglares son considerados uno de los sumideros de carbono más importantes del mundo. Los sumideros de carbono son aquellos ecosistemas que capturan y almacena grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2) procedentes de la atmósfera. En el caso de los manglares, esto ocurre porque almacenan una gran cantidad de carbono en el suelo y sedimentos, donde puede permanecer miles de años; sin embargo, si se degradan o se pierde la cobertura forestal de los manglares, el carbono almacenado se libera nuevamente a la atmósfera, abonando al calentamiento global (Hamilton y Friess, 2018; IPCC, 2006). Es por ello que, para mitigar los efectos del cambio climático, es fundamental desarrollar estrategias de conservación y monitoreo de estos "sumideros de carbono".

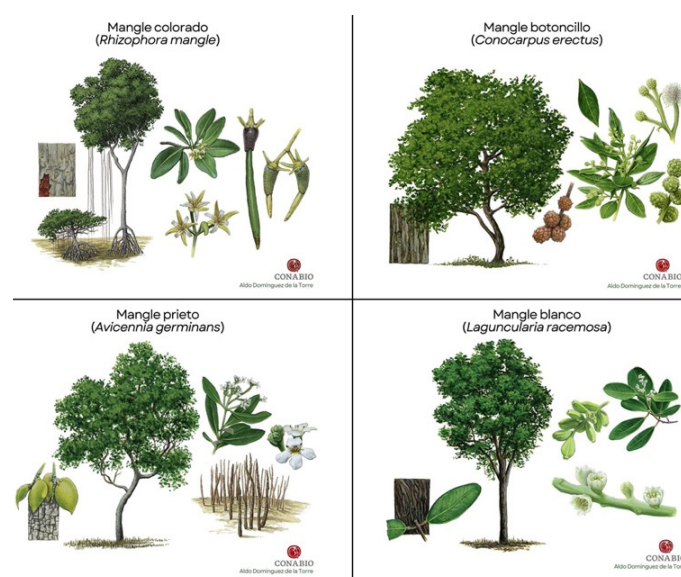


Figura 2.- Especies de manglar de mayor distribución en México. Ilustraciones por Aldo Domínguez de la Torre. CONABIO 2021. <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/manglares>

Se estima que los manglares y praderas marinas (conocidos como ecosistemas de carbono azul), capturan entre dos y cuatro veces más carbono que los bosques tropicales maduros, almacenan de tres a cinco veces más carbono por área, y capturan el equivalente a casi la mitad de las emisiones de CO₂ generadas por el transporte anual global (CONANP, 2017; Donato et al., 2011; SIMAR, 2024). Sin embargo, a pesar de su importancia, se encuentran entre los ecosistemas más amenazados del mundo debido a la deforestación y la urbanización.

TECNOLOGÍA SATELITAL PARA EL ESTUDIO Y MONITOREO DE LOS MANGLARES

En las últimas décadas, la teledetección se ha ido posicionando como una herramienta muy poderosa para el desarrollo de estrategias de monitoreo de diversos ecosistemas. Lo anterior se debe a la hipótesis que relaciona algunos atributos ecosistémicos, como la diversidad de especies o la biomasa, con la variabilidad o diversidad espectral (Palmer et al., 2002). Esta hipótesis ha sido ampliamente validada para múltiples ecosistemas, generalmente en aquellos en donde la complejidad estructural y la diversidad es baja. Sin embargo, se considera que puede ser una poderosa herramienta para el monitoreo de los ecosistemas de manglar.

El principio fundamental de la teledetección o percepción remota se basa en el espectro electromagnético y la variabilidad que existe en la interacción con los objetos de la superficie terrestre, tales como la vegetación, océanos, suelo, ciudades,

etc. En este sentido, explicaremos superficialmente el principio que subyace esta relación. En primer lugar, los sensores remotos que no tienen su propia fuente de energía (pasivos) dependen completamente de la energía solar. La energía del Sol es la más poderosa de todas las fuentes de energía conocidas, y el resultado de su constante fusión nuclear es el espectro electromagnético. Es decir, el espectro electromagnético es la combinación de todas las ondas provenientes del Sol, viajando en el espacio, con diferentes niveles de energía y frecuencia. Por ejemplo, el espectro electromagnético, está integrado por ondas de radio, las cuales son las más “lentas” y “largas” de todas, y se usan para transmitir música en la radio, ver televisión o comunicarnos por el teléfono. Asimismo, las ondas de microondas son un poquito más rápidas que las de radio y hacen vibrar las cosas, principio básico por el cual nuestros microondas calientan la comida, al hacer vibrar sus moléculas de agua. El espectro, también, contiene regiones de la luz visible, las cuales constituyen a los colores del arcoíris (Rojo, amarillo, azul, etc.); hasta llegar a las ondas gamma, las cuales son las más rápidas y poderosas de todas, y desde hace algunas décadas son ampliamente utilizadas en ramas de la medicina, por ejemplo, para la destrucción de células (tumores). Esta energía generada por el Sol atraviesa la atmósfera y al llegar a la superficie terrestre, entra en contacto con los diferentes objetos del planeta, vegetación, agua, áreas urbanas, autos, etc. De la energía que logra penetrar, una parte se absorbe y otra es reflejada y devuelta al espacio; dependiendo de la estructura, composición física y química, el color y la textura de los objetos, será la cantidad de energía que se absorba o se refleje (Figura 3).

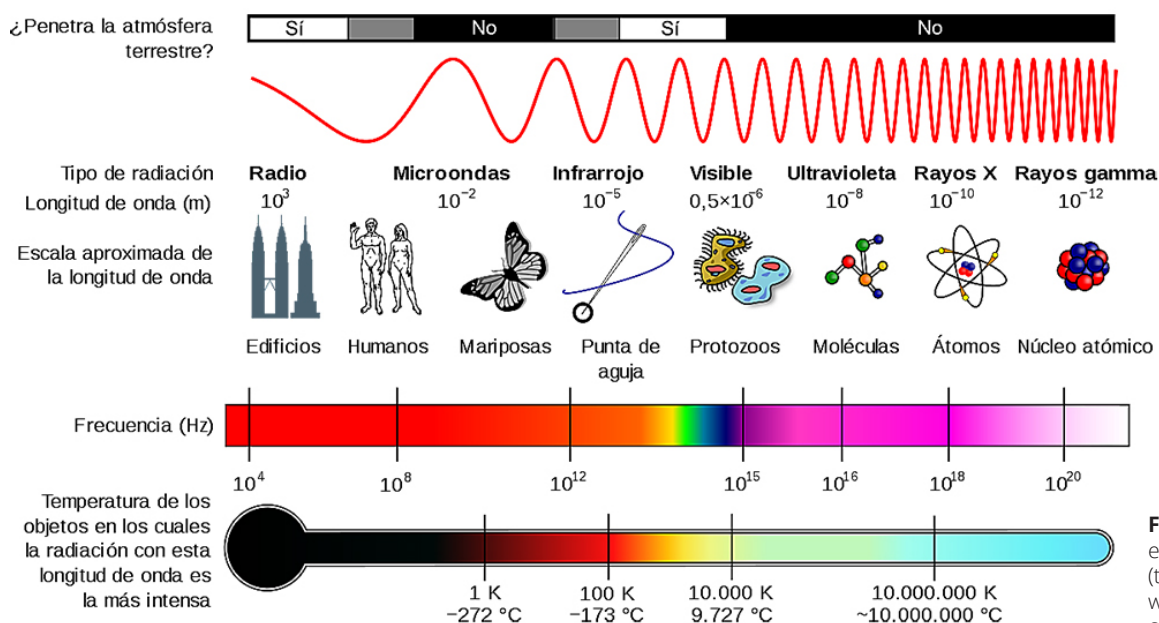


Figura 3. Espectro electromagnético (tomado de <https://www.entornoestudiantil.com/el-espectro-electromagnetico/>)

Tabla 1. Detalle de los sensores más usados en la estimación de biomasa

Sensor	Resolución temporal (cada cuando toma fotos)	Resolución espectral (cuantas bandas tiene)	Resolución espacial (m) (tamaño del píxel)	Banda térmica	Rango de longitud de onda que capta (µm)
Sentinel					
2-A y 2B	5 días	12	10 m (bandas 2- 4 y 8), 20 m (bandas 5-7; 11 y 12), 60 m (bandas 1, 9 y 10)	NA	0.443 - 2.190
Landsat					
4 y 5 Thematic Mapper (TM)	16 días	7	30 m (bandas 1-5, 7), 120 m (bandas 6)	7	0.45 - 12.50
7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	16 días	8	30 m (bandas 1-5, 7), 60 m (bandas 6), 15 m (banda 8)	6	0.45 - 12.50
8 Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS), y 9 OLI-2, TIRS-2	16 días	11	30 m (bandas 1-7, 9), 15 m (banda 8), 100 m (bandas 10 y 11)	10 y 11	0.43 - 12.51

Debido a este principio, y a la utilidad que tiene el observar a los diferentes objetos desde el espacio, desde hace algunas décadas, se han enviado satélites a la órbita terrestre equipados con sensores capaces de registrar las ondas electromagnéticas que reflejan los distintos objetos de la superficie del planeta, para estudiar y monitorear los diversos fenómenos y procesos que ocurren en los diferentes ecosistemas. Entre los satélites más usados se encuentran la misión Landsat (Figura 4), del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), y los sensores Sentinel de la Agencia Espacial Europea (ESA) ambos de libre acceso (Tabla 1).

LA BIOMASA DESDE EL ESPACIO

Uno de los atributos ecosistémicos más importante es la biomasa aérea (hojas, flores, frutos), ya que es a partir de esta variable que podemos estimar la cantidad y volumen de carbono capturado. En este sentido, se estima que aproximadamente hasta el 50% de los almacenes de carbono corresponde a la biomasa aérea; por lo que, resulta clave contar con inventarios y monitoreos de biomasa del ecosistemas considerado uno de los principales sumideros de carbono, los manglares. Sin embargo, el mapeo y estimación de la biomasa aérea de los manglares presenta ciertos retos. Por un lado, muchos árboles de manglar son más pequeños que la resolución de las imágenes satelitales disponibles, lo que dificulta su detección individual. Por otro lado, las especies suelen agruparse en comunidades mixtas, y las similitudes en sus patrones de reflectancia espectral complican la distinción entre ellas (Pham et al., 2019). Por último, la falta de ecuaciones específicas hace que las estimaciones no sean lo suficientemente precisas para que los errores sean bajos. Es importante mencionar que, la manera más precisa de hacer

estimaciones de biomasa es mediante mediciones directas a través del derribo y pesaje de la vegetación; sin embargo, esto implica una inversión considerable en recursos económicos, logísticos y humanos; además de requerir personal y equipo especializado. Por lo anterior, tomando en cuenta estas limitaciones, se ha optado por realizar estimaciones de biomasa a partir del uso de técnicas de percepción remota (Pechanec et al., 2017; Zhu et al., 2019; SIMAR, 2024). Esta estrategia es de bajo costo, y permite analizar grandes áreas, así como realizar comparaciones temporales. Entre los métodos más comunes se incluyen imágenes ópticas (fotografía aérea, imágenes multispectrales e hiperespectrales), datos de radar de apertura sintética (SAR) y LIDAR (Light Detection and Ranging), mediante los que es posible estimar su biomasa y analizar cambios en su extensión y relacionarla con los almacenes de carbono (Pham et al., 2019).



Figura 4. El satélite Landsat observando a los ecosistemas terrestres. Tomada <https://techcrunch.com/2022/07/28/after-50-years-pioneering-satellite-imagery-nasas-landsat-is-ready-for-50-more/>

¿Cómo ocurre esto? Como se mencionó anteriormente, la cantidad de energía que absorben o reflejan los objetos de la superficie terrestre, se conoce como su *firma espectral* (Figura 5), algo así como la “huella dactilar” que caracteriza a cada objeto de la superficie terrestre, y que hace posible su estudio mediante técnicas de percepción remota (PR) (Rosete y Bocco 2003; Edusat, 2024). Los manglares, como ocurre en otras plantas, poseen estructuras celulares llamadas cloroplastos, responsables de captar la luz para la producción de azúcares, tienen la capacidad de absorber luz en las regiones del azul y del rojo del espectro electromagnético, reflejando en cierta medida aquellas regiones del verde, lo que le confiere este color a la vegetación. Por lo tanto, en las imágenes satelitales, las áreas ricas en clorofila se verán más verdes, y puede usarse como un indicador de la vitalidad de los manglares, su calidad como hábitat (Aguilar, 2015; Donato et al., 2011).

Una forma relativamente sencilla de estudiar los ecosistemas de manglar es a partir del uso de índices de vegetación, los cuales son medidas derivadas de imágenes satelitales o aéreas que se utilizan para cuantificar las condiciones, densidad, y salud de la vegetación en una región. Estos índices combinan diferentes regiones del espectro electromagnético, como el rojo y el infrarrojo cercano, para resaltar características específicas de las plantas. Por ejemplo, el índice de vegetación más común es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), que evalúa la cantidad de vegetación verde en la superficie de la Tierra. Los insumos para la determinación de los índices de vegetación dependerá de la resolución espacial de interés, por ejemplo, si el interés es en una resolución media, su sugiere el uso del sensor Landsat (900m²) como insumo; mientras que, si se requiere una resolución espacial más fina, se recomienda el uso del sensor Sentinel 2 (100m²).

También es posible utilizar sensores denominados activos, los cuales tienen su propia fuente de emisión de energía, por ejemplo, el sensor LiDAR (Light Detection and Ranging). Este tipo de sensor utiliza pulsos láser para generar modelos tridimensionales de la vegetación, y proporciona información detallada de la altura, la densidad y la estructura del dosel. Asimismo, el sensor Radar de Apertura Sintética (SAR), puede penetrar el dosel de los bosques y proporcionar información sobre su estructura y biomasa, incluso en condiciones de nubes o lluvia. En ambos casos, estas tecnologías de LiDAR y SAR, dada la relación de la altura, el diámetro y la densidad de la vegetación del manglar, con la biomasa permiten estimaciones más precisas de la biomasa de los ecosistemas de manglar.

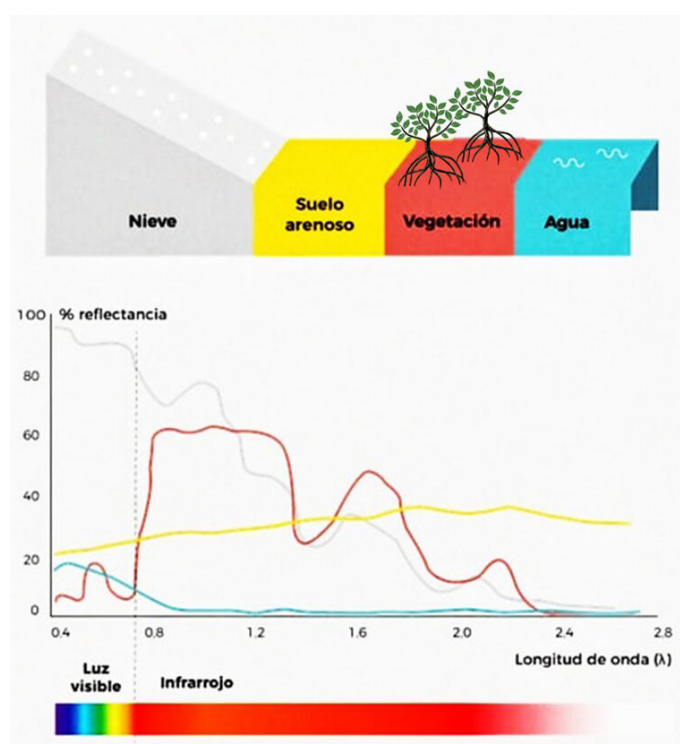


Figura 5.- Firma espectral de la nieve, suelo arenoso, vegetación y agua (Edusat, 2024)

Independientemente de la herramienta que se elija, es importante tener estimaciones en campo. Conocer la altura, composición de especies, edad, diámetro de los árboles y la densidad, es clave para calibrar los modelos que relacionan las características físicas del manglar, obtenidas por sensores remotos, con el carbono aéreo, y con ellos poder realizar estimaciones precisas y extrapolarlas a grandes áreas de manglar.

CONCLUSIONES

Los manglares son ecosistemas clave que no solo brindan importantes servicios ambientales, como la protección de costas y la conservación de la biodiversidad, sino que también desempeñan un papel esencial en la mitigación del cambio climático. Al actuar como sumideros de carbono, los manglares capturan y almacenan grandes cantidades de carbono tanto en su biomasa como en los sedimentos. Sin embargo, estos ecosistemas enfrentan graves amenazas debido a la deforestación, la expansión urbana y los cambios en el uso del suelo, lo que libera el carbono almacenado y contribuye al calentamiento global.

Para garantizar su conservación, es crucial monitorear de manera efectiva los cambios en la extensión y la biomasa de los manglares. En este contexto, la

percepción remota ha emergido como una herramienta indispensable. Tecnologías como los satélites Landsat y Sentinel permiten obtener datos multiespectrales que proporcionan información detallada sobre la vegetación y la salud de los manglares. Además, herramientas avanzadas como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y LIDAR permiten evaluar la estructura del dosel y estimar de manera precisa el carbono almacenado en la biomasa aérea.

A pesar de la gran utilidad de la percepción remota, las mediciones en campo continúan siendo fundamentales para mejorar la precisión de las estimaciones. La altura de los árboles, el diámetro del tronco, la edad y la densidad de las especies son parámetros esenciales para calibrar los modelos derivados de los sensores remotos. Por lo que es necesario combinar tecnología y campo para fortalecer las estrategias de conservación y gestión de los manglares, ecosistemas que juegan un papel fundamental en la regulación del clima global.

La implementación de políticas que promuevan la protección y restauración de estos importantes ecosistemas es imperativa para asegurar su contribución a la mitigación del cambio climático y la preservación de la biodiversidad. La ciencia, la tecnología y la acción política deben alinearse para garantizar la protección a largo plazo de los manglares y los beneficios que aportan a la salud del planeta.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo es el resultado de una investigación documental realizada en el curso Fundamentos de percepción remota y ecología del paisaje. Los autores agradecemos a la SECITHI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación) por la beca # 1221556 y el financiamiento de los proyectos #526 – Gestión de datos obtenidos por la Estación Receptora de Información Satelital ERIS-Chetumal; y #2179 – Adaptación al cambio climático en la producción agropecuaria en la frontera sur de México.



LITERATURA CITADA

- Agráz-Hernández, C.M., R. Noriega-Trejo, J. López-Portillo, F.J. Flores-Verdugo, J.J. Jiménez-Zacarías. 2006. Guía de campo. Identificación de los manglares en México. Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México, 45 pp.
- Aguilar, R.N. 2015. Percepción remota como herramienta de competitividad de la agricultura. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 6(2): 399-405.
- CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). 2017. Importancia del carbono azul. En: <https://www.gob.mx/conanp/documentos/la-importancia-del-carbono-azul> (Consultado el 10 de enero de 2024).
- Davidson, N.C. y C.M. Finlayson. 2019. Updating global coastal wetland areas presented in Davidson and Finlayson (2018). *Marine and Freshwater Research*. 70(8): 1195-1200.
- Donato, D., J.B. Kauffman, D. Murdiyarso, S. Kurnianto, M. Stidham, M. Kannien. 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*. 4: 293-297. <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>
- Edusat. 2024. Qué es la teledetección. En: <https://www.edu-sat.com/teledeteccion/?lang=es> (Consultado el 10 de enero de 2024).
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2016. Climate Change and Food Security: Risks and Responses. FAO. 122 pp. <http://www.fao.org/3/a-i5188e.pdf>
- Hamilton, S.E. y D.A. Friess. 2018. Global carbon stocks and potential emissions due to mangrove deforestation from 2000 to 2012. *Nature Climate Change*. 8(3): 240-244.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change, Nueva York, 2006.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration) Climate Change and Global Warming Portal. 2024. Global Climate Change: Effects of Global Warming. NASA's. En: <https://climate.nasa.gov/effects> (consultado el 08/11/2024).
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) Global Monitoring Laboratory. 2024. Trends in atmospheric carbon dioxide. En: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/> (consultado el 08/11/2024).
- Palmer, M. W., Earls, P. G., Hoagland, B. W., White, P. S., & Wohlgemuth, T. (2002). Quantitative tools for perfecting species lists. *Environmetrics*, 13(2), 121-137.
- Pechanec, V., F. Stržínek, J. Purkyt, L. Štěrbová, P. Cudlín. 2017. Carbon stock in forest aboveground biomass - comparison based on Landsat data. *Central European Forestry Journal*. 63: 126-132. <http://doi.org/10.1515/forj-2017-0014>
- Pham, T.D., N. Yokoya, D.T. Bui, K. Yoshino, D.A. Friess. 2019. Remote sensing approaches for monitoring mangrove species, structure, and biomass: Opportunities and challenges. *Remote Sensing*. 11(3): 230 <https://doi.org/10.3390/rs11030230>
- Rodríguez-Zúñiga, M.T., C. Troche-Souza, A.D. Vázquez-Lule, J.D. Márquez-Mendoza, B. Vázquez-Balderas, L. Valderrama-Landeros, S. Velázquez-Salazar, M.I. Cruz-López, R. Ressler, A. Uribe-Martínez, S. Cerdeira-Estrada, J. Acosta-Velázquez, J. Díaz-Gallegos, R. Jiménez-Rosenberg, L. Fueyo-Mac Donald, C. Galindo-Leal. 2013. Manglares de México: extensión, distribución y monitoreo. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México D.F. 128 pp.
- Rosete, F. y G. Bocco. 2003. Los sistemas de información geográfica y la percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales. *Gaceta ecológica*. 68: 43-54.
- Russi, D., P. ten Brink, A. Farmer, T. Badura, D. Coates, J. Förster, R. Kumar, N. Davidson. 2013. The economics of ecosystems and biodiversity for water and wetlands. IEEP, London and Brussels, 78, 118p.
- SIMAR (Sistema de Información y Análisis Marino Costero). 2024. Carbono azul. En: https://simar.conabio.gob.mx/carbono_azul/ (Consultado el 12 de enero de 2024).
- Spalding, M., M. Kainuma, L. Collins. 2010. World Atlas of Mangroves (version 3.1). A collaborative project of ITTO, ISME, FAO, UNEP-WCMC, UNESCO-MAB, UNU-INWEH, and TNC. Earthscan, London. 319 pp. <https://doi.org/10.34892/w2ew-m835>.
- Velázquez-Salazar, S., M.T. Rodríguez-Zúñiga, J.A. Alcántara-Maya, E. Villeda-Chávez, L. Valderrama-Landeros, C. Troche-Souza, B. Vázquez-Balderas, I. Pérez-Espinosa, M.I. Cruz-López, R. Ressler, D.V.G. De la Borbollaagr, O. Paz, V. Aguilar-Sierra, F. Hruby, J.H. Muñoa-Coutiño. 2021. Manglares de México. Actualización y análisis de los datos 2020. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México CDMX. 168 pp.
- Zhu, Z., M.A. Wulder, D.P. Roy, C.E. Woodcock, M.C. Hansen, V.C. Radelo, T.A. Scambos. 2019. Benefits of the free and open Landsat data policy. *Remote Sensing of Environment*. 224: 382-385. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.016>