RIGTIG
RED DE INVESTIGACIÓN EN GESTIÓN DEL TERRITORIO Y TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOESPACIAL

VI Conferencia RIGTIG 2024
Cambio climático, territorio y planificación

# Evaluación del contenido de clorofila en tres especies de mangles empleando un enfoque híbrido e imágenes Sentinel-2

Alexey Valero Jorge[1], Roberto González De Zayas[2,3], Felipe Matos Pupo[4], Rogert Sorí[5], Ángel Luis Becerra[6] y Sandra Buján[7]

[1]Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón, España (avalero@cita-aragon.es); [2]Universidad de Ciego de Ávila, Cuba (roberto.gz710803@gmail.com); [3]Centro de Estudios Geomáticos, Ambientales y Marinos, México; [4]Centro Meteorológico Provincial de Ciego de Ávila, Cuba (felipe.matos@cav.insmet.cu); [5]Universidad de Vigo, España (rogert.sori@uvigo.es); [6]Taller de Geodesia y Catastro Morón, Cuba (angelluisbg94@gmail.com); [7]Universidad de León, España (sbujs@unileon.es)

## Introducción

Los manglares son ecosistemas únicos que se encuentran en la zona de transición entre la tierra y el mar en las regiones costeras tropicales y subtropicales. Estos bosques han evolucionado para prosperar en condiciones extremas, y proporcionan una serie de servicios ecosistémicos vitales, incluyendo la protección de las comunidades costeras (Binh et al., 2022). Para monitorear la salud y la dinámica de estos ecosistemas, la teledetección a través de observaciones aéreas y satelitales se ha convertido en un elemento fundamental. Dada la naturaleza inaccesible, dinámica y extensa de los manglares, las visitas de campo frecuentes y extensas son complicadas. Por lo tanto, la teledetección es una herramienta esencial para obtener información precisa y actualizada sobre estos ecosistemas. Para comprender en mayor medida cómo reacciona este ecosistema ante las presiones ambientales, es fundamental combinar información sobre su extensión y fragmentación con variables biofísicas (ej: contenido de clorofila y otros pigmentos auxiliares, contenido de agua, índice de área foliar, entre otros) (Pham et al., 2019).

El **objetivo principal** de este estudio es la estimación del contenido de clorofila en zonas de mangle en Cayo Coco (Cuba) empleando modelos biofísicos acoplados a algoritmos de aprendizaje automático desde una perspectiva de Cambio Climático.

Los **objetivos específicos** de este estudio son: 1) Desarrollo de un modelo de estimación de contenido de clorofila en zonas de mangle a partir de variables derivadas de imágenes Sentinel-2; y 2) Análisis de los resultados conjuntamente con datos de precipitaciones actuales y estimadas futuras.

## Área de Estudio y Datos

Los tres ecosistemas de mangles estudiados se encuentran ubicados en Cayo Coco, perteneciente al Archipiélago Sabana-Camagüey, al norte de la provincia Ciego de Ávila, Cuba (Figura 1). Las condiciones climáticas de Cayo Coco son de naturaleza tropical. Según Köppen y Geiger (Geiger, 1954; Köpen, 1990), el clima se clasifica como Aw. La temperatura media anual observada en Cayo Coco es de 25,8°C y el acumulado de las precipitaciones anuales rondan los 913 mm.

Se estudiaron tres regiones ocupadas por las especies de mangle *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Avicennia germinans* (mangle negro) *y Conocarpus erectus* (Yana), *en* las cuales se delimitaron una serie de regiones homogéneas que contenían las diferentes especies.

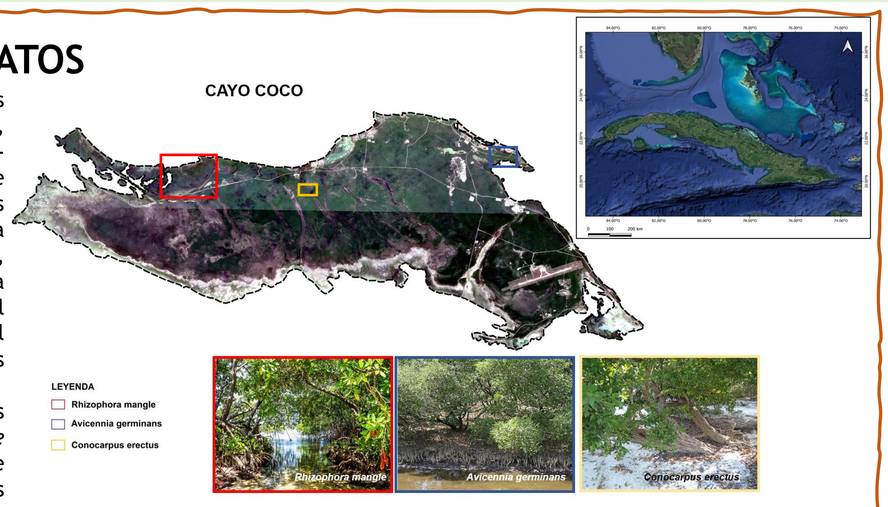


**Figura 1**. Localización del área de estudio.

En estas regiones, se generaron un conjunto de puntos de forma aleatoria que fueron empleados para extraer los valores de reflectancia espectral de las series temporales mensuales (años 2022 – 2023) de las imágenes Sentinel-2 (S2) con un nivel de procesamiento Level-2A a nivel de superficie. A partir de las bandas de S2 se calcularon diferentes índices de vegetación. Se emplearon tres métodos de extracción: i) simple, ii) bilinear y iii) 15 m buffer.

Los datos meteorológicos empleados en el estudio corresponden a la serie temporal de los acumulados mensuales de precipitaciones durante el periodo de 2021-2022 en la estación Meteorológica de Cayo Coco, perteneciente a la red de estaciones del Instituto de Meteorología de Cuba.

Adicionalmente, para la misma localización de la estación meteorológica anterior, se obtuvieron los datos estimados de precipitación mensual para el año 2030 bajo los escenarios climáticos SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP4-6.0 y SSP5-8.5, contenidos en el modelo climático CMIP6.

## Metodología

Se desarrolló un enfoque híbrido que utiliza imágenes S2 y el modelo PROSAIL-PRO. Para entrenar y probar el enfoque de Machine Learning (ML), fueron realizadas 10000 simulaciones con los modelos de Transferencia Radiativa. Para evitar posibles soluciones mal planteadas, fueron restringidas todas las entradas en la tabla de búsqueda (LUT), basándonos en datos de campo e información de la literatura y simulaciones preliminares para garantizar que las LUT resultantes estuvieran dentro del rango de las observaciones registradas en las regiones de estudio (Figura 2). Los modelos empleados para la recuperación del contenido de clorofila fueron: i) Random Forest (RF) y ii) Boost General Lineal Model (BGLM). Para entrenar y validar los modelos de ML se dividieron primero aleatoriamente en dos grupos los rasgos simulados con PROSAIL-PRO, la muestra de entrenamiento con el 80% de las simulaciones y la muestra de prueba con el 20%. La evaluación del rendimiento de cada modelo de ML se realizó utilizando la LUT de validación (Figura 2). Se calcularon métricas clave como el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y el coeficiente de determinación ($R^2$).

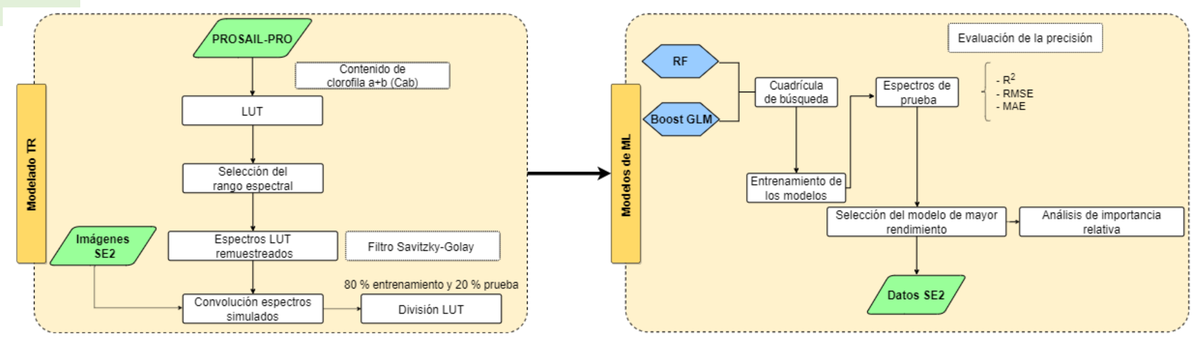


**Figura 2**. Esquema metodológico para la recuperación del Cab a partir del modelo PROSAIL-PRO y los datos de Sentinel-2.

A partir de los resultados de las métricas antes mencionadas, se seleccionó el modelo con mejor rendimiento para recuperar el Cab. Seleccionado el modelo, se realizó un análisis de la importancia relativa de las variables predictoras. Para la validación de las predicciones del Cab sobre las observaciones de las imágenes de S2, fue utilizado el mejor índice espectral seleccionado, basándonos en el análisis de correlación de Pearson.

El procesamiento de las imágenes S2 y la recuperación del contenido de clorofila se llevó a cabo utilizando varios códigos desarrollados en el entorno de software R (R Core Team, 2023).

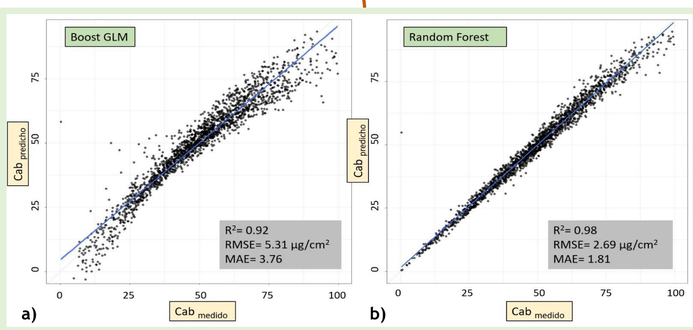


**Figura 3**. Resultado cuantitativo del ajuste de modelos para la recuperación del Cab empleando a) Boost General Lineal Model (BGLM) y b) Random Forest.

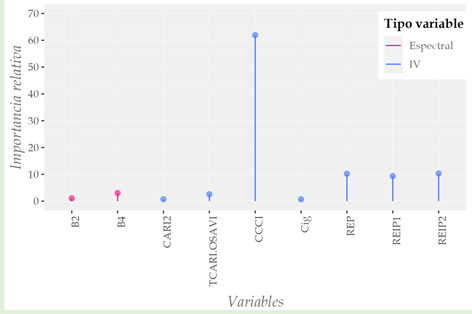


**Figura 4**. Resultado del análisis de importancia de variables en el cálculo del contenido de clorofila.

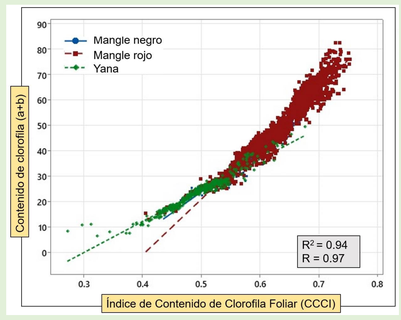


**Figura 5**. Relación lineal y correlación de Pearson entre los valores de Cab recuperados y el índice de vegetación CCCI .

## Resultados y Discusión

### Estimación del contenido de clorofila en zonas de mangle

A partir de los resultados de la evaluación del rendimiento de los modelos, se determinó que el mejor modelo para la recuperación del Cab simulado empleando PROSAIL-PRO fue RF (Figura 3b) con un valor de $R^2$= 0,98 y unos valores de RMSE y MAE iguales 2,69 µg/cm² y 1,81 respectivamente. El análisis de la importancia relativa mostró como aquellos índices que combinan bandas de las regiones de Borde Rojo, NIR y el visible, fueron los de mayor aporte dentro del modelo, destacando el Índice de Contenido de Clorofila Foliar (CCCI), la Interpolación lineal de posición de borde rojo (REP), el Punto de inflexión de borde rojo 1 (REIP1) y el Punto de inflexión de borde rojo 2 (REIP2), resultado consistente con lo planteado por Rouse et al. (1974); Peñuelas et al. 1993 o Gitelson et al. (2003) (Figura 4). Tal y como se observa en la Figura 5, la validación del Cab recuperado a partir de los datos de S2 extraídos mediante el método 15m buffer con el Índice de Contenido de Clorofila Foliar, mostró valores satisfactorios, con un $R^2$=0,94 y una correlación de Pearson R=0,97, superando a los valores recuperados mediante los métodos de extracción bilinear y simple, con valores de $R^2$ iguales a 0,87 y 0,83 respectivamente. Finalmente, los mayores valores medios de Cab calculados se observaron en la especie mangle rojo (MR) con 50,3 µg/cm² seguido del mangle negro (MN) con 36,2 µg/cm² y la Yana (YN) con 23,9 µg/cm². Tal y como se observa en la Figura 6, el método de extracción de los valores espectrales/índices de vegetación afecta a la estimación del contenido de clorofila, principalmente incrementando la presencia de *outliers* en el caso de emplear el método simple en lugar del buffer de 15 m. Como consecuencia, la variabilidad en la estimación del contenido de clorofila también se ve incrementada. Sin embargo, dicho comportamiento no se observa de igual forma para las tres especies de mangle estudiadas. Si bien la especie YN ve reducida de manera notable su variabilidad en cada uno de los meses considerados empleando el método buffer de 15 m en lugar del simple, no así la especie MR.

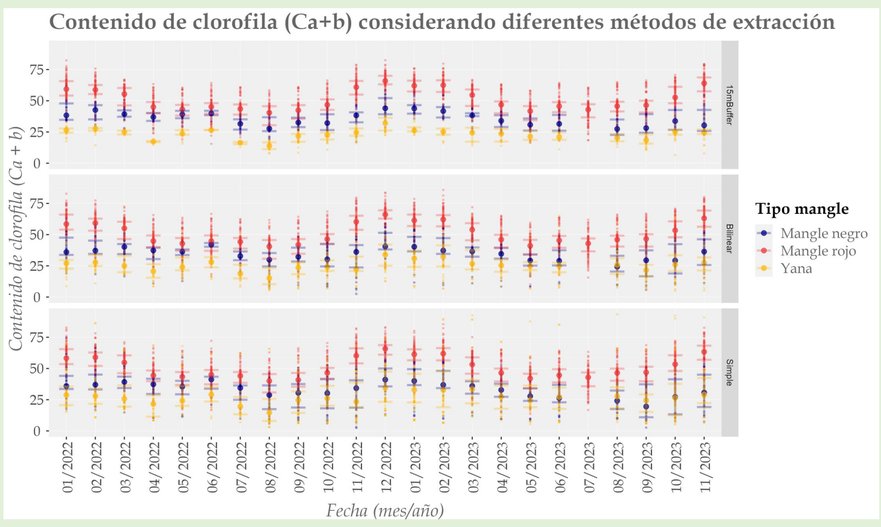


**Figura 6**. Resultado de la estimación de clorofila a partir del modelo derivado de RF usando 3 métodos de extracción/asignación de valores a los elementos de la muestra para las tres especies de mangle.

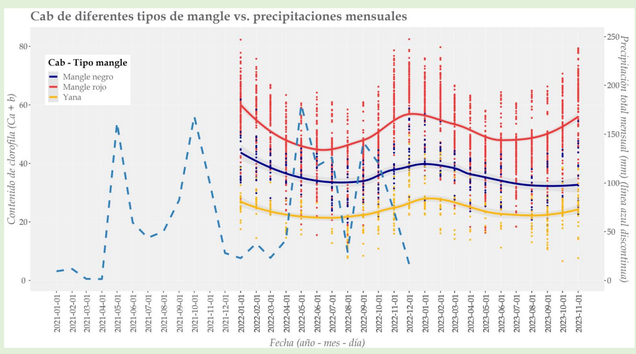


**Figura 7**. Contenido de clorofila en los diferentes tipos de mangle en el periodo 2022-2023 en relación a los valores de precipitación en el periodo 2021-2022 (datos de la estación meteorológica de Cayo Coco).

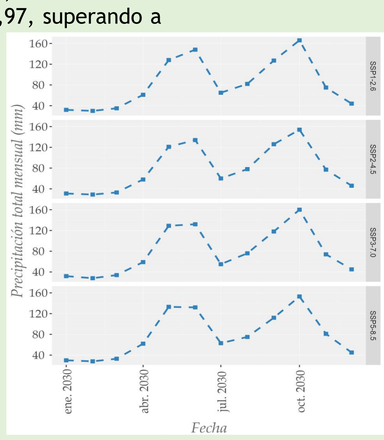


**Figura 8**. Predicción de precipitaciones totales para el año 2030 empleando el modelo CMIP6 bajo 4 escenarios climáticos (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP4-6.0, y SSP5-8.5).

### Contenido de clorofila vs precipitación presente y futura

Con el propósito de analizar de manera gráfica la posible relación entre las precipitaciones y el contenido de clorofila estimado para diferentes especies de mangle, en la Figura 7 se integraron los valores de precipitación totales mensuales para los años 2021 y 2022, registrados por la estación meteorológica de Cayo Coco, y el Cab estimado en este estudio. A partir de dicha gráfica se observa el patrón por el que se intercalan periodos poco lluviosos (noviembre a abril) con periodos lluviosos (mayo a octubre). Comparativamente con los datos de Cab, se observa como los periodos poco lluviosos van seguidos de una reducción del contenido de clorofila, en mayor o menor medida dependiendo del tipo de mangle. Garcés y García (2019) mostraron en su estudio como el contenido de clorofila se encontraba relacionado con la salinidad, de manera que a mayor salinidad menor contenido de clorofila. Hecho que se refleja en los datos mostrados en la Figura 7.

Los escenarios climáticos futuros en base al modelo climático CMIP6, en mayor o menor medida, afianzan los periodos poco lluviosos y muestran una ligera reducción de las precipitaciones en los periodos lluviosos para el año 2030 (Figura 8). Esto implica que los valores de salinidad no se verán reducidos en la misma medida que en la actualidad, con la consecuente disminución del contenido de clorofila en las superficies de mangle. Esta circunstancia pone de manifiesto la vulnerabilidad de estos singulares ecosistemas al Cambio Climático (CC) y la necesidad de desplegar, de manera inmediata, medidas de adaptación con el propósito de incrementar la resiliencia de dichos entornos a los efectos no deseados del CC.

## Conclusiones

Los modelos desarrollados en este estudio representan una herramienta sólida y versátil para la recuperación de contenido de clorofila en tres especies de mangles. El CCCI es la variable más relevante con diferencia (en base a la Figura de la importancia de variables), por tanto, sus características son transmitidas al contenido de clorofila de los diferentes tipos de mangle, produciendo una reducción de la dispersión en los valores de clorofila entre especies empleando el método de extracción de buffer de 15 m. El empleo de este método de extracción puede mejorar los resultados de estimación de contenido de clorofila en el mangle.

La metodología propuesta, que combina algoritmos de aprendizaje automático con un modelo de transferencia radiativa y utiliza imágenes de Sentinel-2, no se limita únicamente a estas especies de mangle en esta región y escala. Más bien, puede aplicarse a otras especies vegetales, superando las restricciones comunes de los métodos tradicionales que a menudo carecen de robustez y transferibilidad al estar específicamente adaptados a un sitio, especie o período de tiempo particular.

## Bibliografía

Binh, N.A., Hauser, L.T., Viet Hoa, P., Thi Phuong Thao, G., An, N.N., Nhut, H.S., Phuong, T.A., y Verrelst, J. (2022). Quantifying mangrove leaf area index from Sentinel-2 imagery using hybrid models and active learning. Int. J. Remote Sens. 43, 5636-5657.

Garcés Gracia, A. A., y García Cruzatti, A. I. (2019). Comparación estacional sobre la funcionalidad fotosintética de Rhizophora harrisonii en sitios aledaños al estero salado de Guayaquil e Isla Santay y plan de acción para mitigar la polución en los manglares (Bachelor's thesis, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Química).

Geiger, R. (1954). Landolt-Börnstein-Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik, alte Serie Vol. 3. Ch. Klassifikation der Klimate nach W. Köppen.-Springer, Berlin, 603-607.

Gitelson, A. A., Viña, A., Arkebauer, T. J., Rundquist, D. C., Keydan, G., y Leavitt, B. (2003). Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophysical research letters*, *30*(5).

Köppen, W. (1900). Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. Geographische Zeitschrift, 6(11. H), 593-611.

Peñuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L., y Save, R. (1993). The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant. Int. J. Remote Sensing, 14(10), 1887-1905.

Pham, T. D., Yokoya, N., Bui, D. T., Yoshino, K., y Friess, D. A. (2019). Remote sensing approaches for monitoring mangrove species, structure, and biomass: Opportunities and challenges. *Remote Sensing*, *11*(3), 230.

R Core Team (2023). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., y Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec. Publ*, *351*(1), 309.

UIDE · Universidad del Azuay · Universidad Católica de Santiago de Guayaquil · ESPE · Pontificia Universidad Católica del Ecuador · UTPL · Universidad de León · USC · IAEN