



Informe final de Proyecto de Investigación

DIGI-PUI-004

Informe final de proyecto de investigación

Universidad de San Carlos de Guatemala

Dirección General de Investigación

Programa Universitario de Investigación en Recursos Naturales y Ambiente

**Producción vegetal primaria bruta multianual en el ecosistema de manglar, Las Lisas – La Barrona,
Pacífico de Guatemala.**

**Unidad avaladora: Instituto de Investigaciones Hidrobiológicas -IIH-, Centro de Estudios del Mar y
Acuicultura
4.8.26.2.99**

Nombre del coordinador: Msc. Daniel Esteban Manzo Barrientos

Guatemala 27/02/2026



Informe final de Proyecto de Investigación

Contraportada

Autoridades de la Dirección General de Investigación

Dra. Alice Patricia Burgos Paniagua

Directora General de Investigación

Msc. Andrea Eunice Rodas Moran

Coordinadora del Programa Universitario de Investigación

Autores

Msc. Daniel Esteban Manzo Barrientos, 20160191

T.A. Andry Rebeca Chávez Gilbert, 20250918

T.A. Estefanía Quintanilla Carxaj, 20250911

El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la DIGI de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la partida presupuestaria número: 4.8.26.2.99, en el Programa Universitario de Investigación en Recursos Naturales y Ambiente.

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.

Este informe está licenciado bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

Puede copiarse, distribuirse y adaptarse con la condición de dar crédito a los autores, no usarlo con fines comerciales y compartir cualquier obra derivada bajo la misma licencia.

Para más información, visite: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>



Informe final de Proyecto de Investigación

Convocatoria Diferenciada DIGI 2024
para presentar propuestas de investigación a ejecutarse en 2025

Índice general

Resumen.....	2
Palabras clave.....	2
Abstract	3
Keywords	3
1. Introducción	4
2. Contexto de la investigación.....	7
3. Revisión de literatura	9
4. Planteamiento del problema.....	17
5. Objetivos	19
6. Hipótesis	20
7. Método	20
7.1. Tipo de investigación.....	20
7.2. Enfoque y alcance de la investigación.....	20
7.3. Diseño de la investigación.....	21
7.4. Población, muestra y muestreo.....	21
7.5. Técnicas.....	24
8. Resultados	37
9. Discusión de Resultados	45
10. Beneficiarios directos e indirectos.....	50
11. Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.....	50
12. Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND).....	51
13. Vinculación.....	52
14. Conclusiones	53
15. Recomendaciones	54
16. Referencias.....	56



Informe final de Proyecto de Investigación

Resumen

En el ecosistema de manglar de Las Lisas–La Barrona, se han cuantificado el stock de carbono, pero no así las tasas de absorción atmosférica por acción fotosintética. Se evaluaron distintas fuentes satelitales de radiación fotosintéticamente activa (PAR), ERA5, GOES y MODIS, con el objetivo de identificar el mejor producto para estimar la productividad primaria bruta (GPP). Se realizó la comparación estadística entre datos satelitales y mediciones con piranómetros. MCD18 V6.1 y V6.2 presentaron las mejores correlaciones, alcanzando promedio de R^2 de 0.64 con piranómetros en Guatemala y superiores a 0.79 con piranómetros de alta precisión en México, seguido de GOES con R^2 de 0.8 y ERA5 con 0.33. Considerando los resultados, el mejor error medio sesgado (MBE) fue para MODIS_V6.2 con $-0.17 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, y tanto para el error absoluto medio (MAE) y el error cuadrático medio (RMSE), fue para MODIS_V6.1 con 0.91 y $1.15 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ respectivamente.

Considerando la mejor PAR, índices de vegetación y de temperatura, se estimó la GPP mediante el modelo de Monteith, integrando información espectral derivada de imágenes de Sentinel-2. Los resultados revelaron una variabilidad interanual de la GPP entre 1688 y $2903 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ durante el periodo 2016–2025, con un promedio de $2275 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$.

En ausencia de mediciones directas de intercambio de carbono mediante torres de flujo Eddy Covariance, se realizó una validación indirecta comparando las estimaciones de GPP derivadas de Sentinel-2 con el producto global MOD17 de MODIS. Ambas estimaciones mostraron concordancia en el orden de magnitud de la productividad, presentando Sentinel-2 valores aproximadamente 15 % mayores, atribuibles principalmente a su resolución espacial (10 m) en comparación con los 500 m de MODIS, lo que permite capturar con mayor detalle la heterogeneidad estructural del ecosistema de manglar.

Palabras clave

1. Producción Primaria Bruta	2. Radiación fotosintéticamente activa	3. Índices de vegetación	4. Sentinel-2	5. MODIS
------------------------------	--	--------------------------	---------------	----------

Informe final de Proyecto de Investigación

Abstract

In Las Lisas–La Barrona mangrove ecosystem have been quantified the stock of carbon, but not the rates of absorption from the atmosphere by the photosynthesis. Different satellite sources of photosynthetically active radiation (PAR), ERA5, GOES, and MODIS, were evaluated to identify the best product for estimating gross primary productivity (GPP). A statistical comparison was performed between satellite data and pyranometer measurements. MCD18 V6.1 and V6.2 showed the best correlations, achieving an average R^2 of 0.64 with pyranometers in Guatemala and values greater than 0.79 with high precision pyranometers in Mexico, followed by GOES with an R^2 of 0.8 and ERA5 with 0.33. Considering the outputs, the best mean biased error (MBE) was for MODIS_V6.2 with -0.17 MJ·m⁻², and for both the mean absolute error (MAE) and the root mean square error (RMSE), it was for MODIS_V6.1 with 0.91 and 1.15 MJ·m⁻² respectively.

Considering the best PAR, vegetation indices, and temperature indices, the GPP was estimated using the Monteith model, integrating spectral information derived from Sentinel-2 images. The results revealed an interannual variability of the GPP between 1688 and 2903 gC·m⁻²·year⁻¹ during the period 2016–2025, with an average of 2275 gC·m⁻²·year⁻¹.

In the absence of direct carbon exchange measurements using Eddy Covariance flux towers, indirect validation was performed by comparing GPP estimates derived from Sentinel-2 with the MODIS global product MOD17. Both estimates showed agreement in terms of the order of magnitude of productivity, with Sentinel-2 presenting values approximately 15% higher, mainly attributable to its spatial resolution (10 m) compared to MODIS's 500 m, which allows for a more detailed capture of the structural heterogeneity of the mangrove ecosystem.

Keywords

1. Gross primary production	2. photosynthetically active radiation	3. Vegetation indexes	4. Sentinel-2	5. MODIS
-----------------------------	--	-----------------------	---------------	----------

Informe final de Proyecto de Investigación

1. Introducción

Los gases de efecto de invernadero (GEI), se definen como aquellos constituyentes gaseosos de la atmósfera, de origen natural o antropogénico, con capacidad de absorción y emisión de radiación en en el espectro infrarrojo. Este fenómeno permite la retención de la energía térmica irradiada por la superficie terrestre, la atmósfera y la nubosidad, incidiendo directamente en el balance radiactivo del sistema climático, (Grupo Intergubernamental de Cambio Climático, 2023). Las actividades humanas provocan que haya un exceso de GEI por arriba de las concentraciones normales, comparados con las de estimadas previo a la era industrial, lo que ha provocado un incremento de 1.1 ° C a nivel mundial. Para el 2021 el CO₂ era 149 % más comparado con las concentraciones de la segunda parte del siglo 19. De 1990 al 2021, los impactos de los CO₂ de vida larga se incrementaron del 49 al 80 % (World Meteorological Organization, 2024).

Los manglares desempeñan un papel crucial para las poblaciones al proporcionar alimentos, materiales para la construcción de viviendas, refugio para la fauna y una variedad de servicios ecosistémicos, como la regulación del agua, la protección de las costas, el valor escénico, y beneficios culturales y educativos. A pesar de esto, uno de sus servicios ecosistémicos más importantes y menos investigados es su función como sumideros de carbono. Las reservas de carbono en los manglares y otros ecosistemas costeros marinos, conocidos como "carbono azul", se encuentran entre las más grandes observadas en cualquier tipo de bosque. Según Alongi (2014), los manglares tropicales y subtropicales almacenan en promedio 956 Mg C·ha⁻¹, comparado con 241 C·ha⁻¹ en selvas tropicales, 408 C·ha⁻¹ en pantanos de turba, 593 C·ha⁻¹ en marismas, y 142.2 C·ha⁻¹ en pastos marinos. En esta misma línea, en el área de las Lisas y La Barrona, del pacífico de Guatemala, para el año 2023 se reportaron 624 Mg C·ha⁻¹. De este carbono, entre el 67 % se almacena en el suelo, mientras que el resto se encuentra en la biomasa de raíces y aérea (Manzo et al., 2024).

La Producción Primaria Bruta (GPP), representa la captación total de carbono (C) a través del proceso de la fotosíntesis por unidad de tiempo y por unidad de superficie, siendo importante para entender el ciclo C. Existen técnicas in situ que permiten estimar los flujos de carbono por medio de torres de covarianza de remolinos, Eddy Covariance (EC, por sus siglas en ingles), las cuales brindan

Informe final de Proyecto de Investigación

información sobre la productividad de los ecosistemas y pueden usarse para establecer modelos de productividad. Sin embargo, estos modelos se limitan a una huella espacial de 0.1 a 2 km alrededor de las torres y a la vez son costosos para países como Guatemala, por lo que es sumamente costoso implementar y mantener las torres de EC (Zheng & Takeuchi, 2022).

Los sensores remotos (RS) brindan la oportunidad de caracterizar las estructuras de los ecosistemas y las condiciones ambientales y por lo tanto estimar su productividad. El modelo de eficiencia de uso de la luz (LUE) ha sido ampliamente adoptado para estimar la GPP (Prince & Goward, 1995). Actualmente, los modelos de GPP para bosques terrestres son aplicables a escala global, siendo algunos de estos: el modelo C-fix, MOD17 y GLO-PEM, sin embargo, los modelos de producción no se han evaluado y empleado en bosques de manglares a gran escala, principalmente debido a la falta de comprensión del intercambio de carbono en los bosques de manglares y las mediciones de la torre de flujo (Zheng & Takeuchi, 2022).

La importancia de los ecosistemas de manglar, como proveedores de bienes y servicios ecosistémicos, dentro de estos como reguladores del clima, a través de la mitigación de GEI, impulsa la necesidad de comprender el ciclo del carbono, para lo cual es imprescindible conocer el comportamiento de la GPP a un nivel de mayor detalle, utilizando los datos de las bandas espectrales que proporcionan el satélite Sentinel-2, especialmente para este estudio sus firmas espectrales del azul, rojo, e infrarrojos (Sri Rahayu Romadhoni et al., 2022). Así mismo, es importante que el proceso fotosintético y de GPP de los manglares, es afectado por estresores como la temperatura, salinidad del agua e inundaciones por las mareas (Zheng & Takeuchi, 2022). Datos que se pueden obtener de estaciones meteorológicas y de satélite, especialmente la radiancia para los fines de esta propuesta.

En los bosques de manglar en China, la GPP se ha estimado combinando el modelo LUE con la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida de las imágenes del satélite Sentinel-2. Los resultados mostraron que el modelo LUE desarrollado tiene una precisión general mayor ($RMSE = 0,0051$, $R^2 = 0,64$) que el modelo terrestre ($RMSE = 0,0220$, $R^2 = 0,24$). Se reportó, que el principal factor de estrés ambiental para la fotosíntesis de los bosques de manglares en China fue la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR). La GPP estimada estuvo en general, concordantes con la medición

Informe final de Proyecto de Investigación

in situ de las dos torres de flujo de carbono. En comparación con el producto satelitales de MODIS, la GPP derivada tuvo una mayor precisión, con una mejora del RMSE de 39 a 19 $\text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 8\text{día}^{-1}$ para el año 2012, y de 34 a 20 $\text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 8\text{día}^{-1}$ días en 2015 (Zheng & Takeuchi, 2022).

Durante el período de 2016 a 2020 en TAHURA Ngurah Rai, Bali, Indonesia, se realizó un estudio para reconocer el comportamiento anual de la GPP en el ecosistema de manglares utilizando datos del satélite de teledetección Sentinel-2. El modelo de fotosíntesis de la vegetación (VPM) se utilizó para calcular la GPP anual utilizando el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) y el Índice de Aguas Superficiales Terrestres (LSWI). Ambos índices producto de la teledetección fueron respaldados con datos de temperatura y radiación solar de estaciones meteorológicas para determinar la fracción de fotosíntesis necesaria para los procesos de absorción de carbono atmosférico. Los resultados indicaron que los valores anuales de GPP en los bosques de manglares en TAHURA disminuyeron entre años de observación. El valor total mínimo promedio de GPP en el 2017 fue de 2211 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$, mientras que el valor máximo promedio de GPP en el 2020 fue de 2505 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$. (Sri Rahayu Romadhoni et al., 2022).

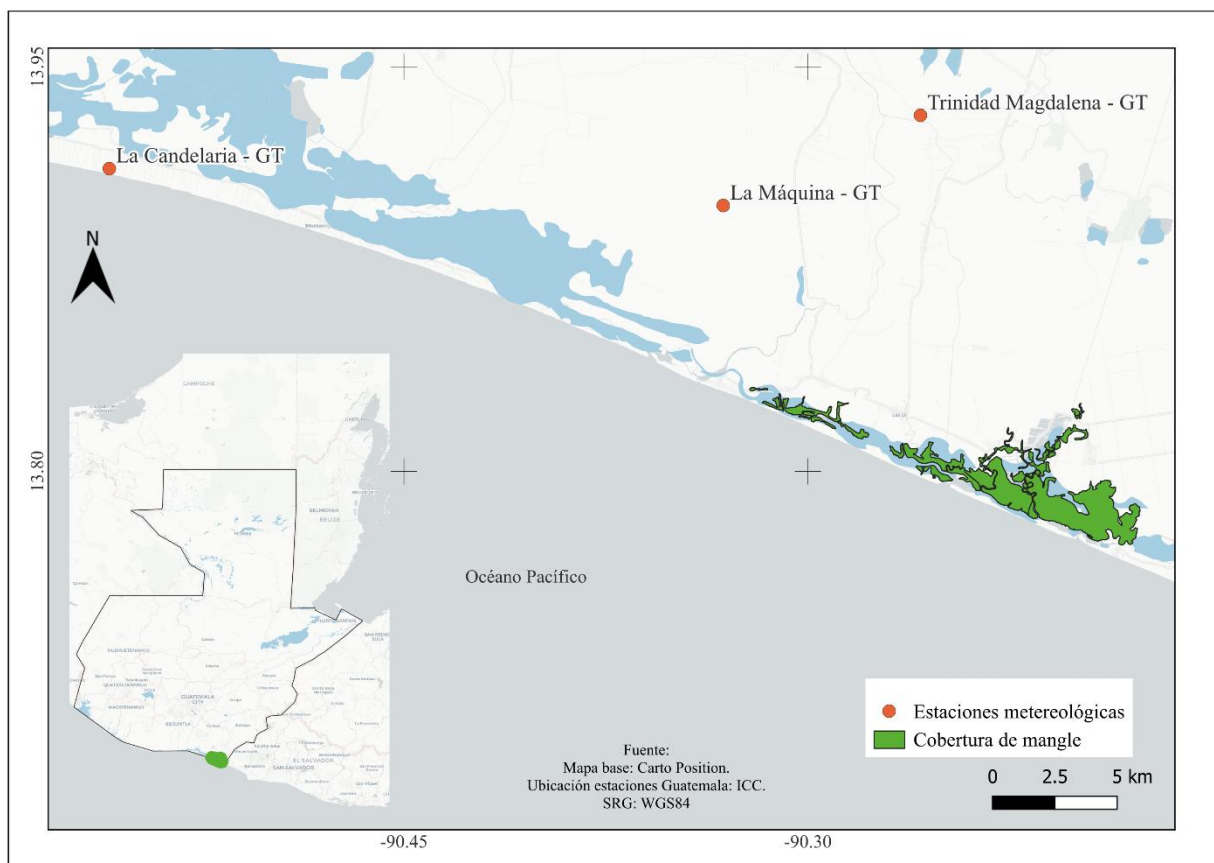
Ante este panorama, el presente estudio evalúa la capacidad de diferentes fuentes satelitales de EO para estimar PAR, validando sus resultados con datos de radiación provenientes de estaciones meteorológicas equipadas con piranómetros. A partir de la fuente de PAR que presenta el mejor desempeño, se cuantifica la GPP en el ecosistema de manglar Las Lisas–La Barrona durante el periodo 2016–2025 mediante el método indirecto de la aproximación de Montieth, aplicando índices de vegetación (IV), mediante el uso de imágenes del sensor Sentinel-2, combinadas con datos de temperatura y variables biofísicas derivadas de sensores remotos. Finalmente, los resultados multianuales obtenidos son contrastados con estimaciones de GPP derivadas de productos satelitales del sensor MODIS, con el fin de evaluar la consistencia entre aproximaciones basadas en sensores de distinta resolución espacial y mejorar la comprensión de la dinámica productiva de este ecosistema de manglar.

Informe final de Proyecto de Investigación

2. Contexto de la investigación

El área denominada Las Lisas – La Barrona, es un ecosistema marino costero que se encuentra localizado en la parte baja entre las desembocaduras de la cuenca del río Los Esclavos y del río Paz, en el litoral del Pacífico sur oriental de Guatemala, ubicada en el municipio de Chiquimulilla, en el departamento de Santa Rosa y el municipio de Pasaco, del departamento de Jutiapa, Figura 1.

Figura 1. Mapa de ubicación del ecosistema de manglar, Las Lisas – La Barrona.



En el área convergen dos aldeas, Las Lisas y Casas Viejas, 14 caseríos siendo los más conocidos: la Sarampaña, El Chapeton, Los Macizos, El Ahumado, Barra del Jiote, y La Barrona, así como cinco fincas. La población total según el censo 2018 de Población y Vivienda, del Instituto Nacional de Estadística era de 3154 personas.

Informe final de Proyecto de Investigación

Este ecosistema tiene una extensión de 5550 ha, con una cobertura de bosque de manglar de 2054 ha equivalente a un 37 %, en donde se encuentran 4 especies de mangle, siendo estas: *Rhizophora mangle*, *Rhizophora racemosa*, *Avicenia germinans* y *Laguncularia racemosa*.

Para el alcance de los objetivos en relación con el análisis temporal, se sistematizaron datos de distintos nodos de consulta y descarga, desde su disponibilidad en internet, su colecta, procesamiento, ordenación y resultados, en una serie temporal de 10 años. La temporalidad del 2016 al 2025 obedece a la disponibilidad de imágenes del satélite Sentinel-2, del programa espacial Copernicus, de la Agencia Europea Aeroespacial (Agency, 2024). La Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR), del producto MCD18C2, versión 6.2, del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) combinado de Terra y Aqua, (Wang, 2024). El producto de Productividad Primaria Bruta (GPP) MOD17A2HGF Versión 6.1, un compuesto acumulativo de 8 días de valores con un tamaño de píxel de 500 metros (m), (Running, 2021).

En el ecosistema de manglar Las Lisas – La Barrona, se han generado una serie de investigaciones relacionadas a la acumulación de carbono, siendo uno de estos el realizado por García et al, durante el año 2021 sobre la estimación de carbono azul del componente suelo, reportándose 675,392.16 Mg de C (García et al., 2022).

Siguiendo la línea de investigación sobre cambio climático, en el 2023, se realizó la investigación sobre Acumulación multitemporal de carbono azul en el dosel del bosque de manglar, Las Lisas-La Barrona, en donde se reportaron en 623,412.17 Mg de C, siendo en la parte del suelo a un metro de profundidad el 67 %, en raíces el 10 %, y arbóreo superior 23 % (Manzo et al., 2024).

Desde la perspectiva como nicho ecológico de muchas especies, se estudio la conectividad del ecosistema manglar para las aves del humedal costero Las Lisas-La Barrona, en donde destaca que la estabilidad de los manglares se sustenta con la conectividad y que si ésta es afectada, se pone en riesgo la función de hábitat para las especies de aves, y que debido a las presiones de cambio de uso del suelo sobre el ecosistema manglar, provoca su reducción y fragmentación y con la alteración las conectividades para las aves (Dávila et al., 2019).

Informe final de Proyecto de Investigación

Si bien todos los estudios relacionados con cuantificar la cantidad de carbono almacenado, estos solo se quedan en el momento de toma de datos para un año en específico, por lo que la presente investigación permite entender en qué medida se ha absorbido el C atmosférico a lo largo de 10 años en el ecosistema de manglar Las Lisas-La Barrona.

3. Revisión de literatura

El análisis de los cambios en las estimaciones a largo plazo de los flujos de CO₂ entre los ecosistemas y la atmósfera es importante para establecer el balance global de carbono, especialmente en los ecosistemas forestales, principales sumideros de carbono atmosférico en la biosfera. Un factor clave de este balance es la GPP, que representa la captación total de carbono a través de la fotosíntesis por unidad de superficie y por unidad de tiempo. Aunque la GPP es la fuente de carbono para todos los flujos en el ecosistema, no existe un método directo para su medición. Se calcula a partir de datos de Producción Primaria Neta (NPP) in situ por medio de torres de covarianza de remolinos (EC) después de la corrección de las pérdidas por respiración (Reichstein et al., 2005).

Sin embargo, se puede estimar la GPP por metodologías indirectas a partir de datos satelitales que se basan en la conocida aproximación de Monteith (Monteith, 1972), que relaciona la GPP con la cantidad de radiación fotosintéticamente activa a través de la eficiencia de conversión, para un intervalo temporal dado, por ejemplo, de un día, GPP (g·m⁻²·día⁻¹), siendo la ecuación:

$$GPP = \varepsilon * fPAR * PAR$$

Donde PAR es la densidad de flujo de la radiación fotosintéticamente activa (MJ·m⁻²·día⁻¹), de la radiación global incidente en el rango de 0.4 – 0.7 μm, y fAPAR, es la fracción entre 0 y 1 de la incidencia de PAR absorbida por el dosel. ε , es la eficiencia de conversión (g·MJ⁻¹), también conocida como el uso eficiente de luz (LUE), que se muestra como la variación espacial entre biomasa, ecosistemas y las especies de plantas, y que varía temporalmente durante la época de crecimiento debido a las limitaciones ambientales y fisiológicas (Connolly et al., 2009)

Informe final de Proyecto de Investigación

El índice de área foliar (LAI) es un parámetro biofísico adimensional que cuantifica la cantidad de follaje por unidad de superficie de suelo. Este permite explicar varios procesos biológicos relacionados con el intercambio de gases por la vegetación (Duchemin et al., 2006), como por ejemplo la fotosíntesis, la respiración celular, la transpiración, los ciclos de nutrientes como C, entre otros (Chen & Cihlar, 1996). La estructura del dosel en la vegetación arbórea, relacionado con el LAI, influye en el proceso de transferencia de energía solar en la vegetación, por lo tanto, las características radiométricas de la altura del dosel también se ven afectadas. El LAI puede determinarse empleando sensores remotos, a través de la relación entre la reflectancia de la altura del dosel o por modelos físicos de transferencia radiactiva del dosel (Liang & Wang, 2020).

La estimación del LAI puede realizarse por medio de métodos directos más precisos pero difíciles de implementar a gran escala, debido al gran consumo de tiempo y la acumulación de errores frente a las repetitivas mediciones (Jonckheere et al., 2004). Estos consisten en coleccionar y medir hojas, por medio, de la destrucción de los especímenes o por la acumulación de estas en árboles deciduos (Chen et al., 1997). Por otra parte, hay métodos indirectos como los ópticos que son ampliamente implementados. Estos requieren medir la luz que es transmitida por el dosel de los árboles (Jonckheere et al., 2004) y, por lo tanto, se emplean sensores remotos para realizar lecturas a gran escala a lo largo del tiempo (Fassnacht et al., 1994).

El LAI puede ser estimado al correlacionar el diámetro, el área basal (Gholz et al., 1979) o el área de albura (Grier & Running, 1977). Se puede relacionar el área de hojas por árbol con el diámetro a la altura del pecho (DAP) por medio de la ecuación: $\log y = a + b \log (x)$. En donde y es el área de hoja en metros cuadrados y x el DAP en centímetros a la altura de 1.3 m sobre el suelo (Gower & Norman, 1991). Por su parte, a y b son coeficientes de la regresión (Gholz et al., 1979) que dependen de la especie de planta, la altura y la disponibilidad de nutrientes. Por ello, es necesario desarrollar ecuaciones alométricas específicas (Liang & Wang, 2020).

El uso de IV espectral se ha documentado para mostrar una derivada de la reflectancia de la superficie con respecto a la longitud de onda, debido a las propiedades ópticas de las partículas de las hojas y el

Informe final de Proyecto de Investigación

suelo. En el caso de vegetación densa, la derivada espectral es indicador de la cantidad absorbida por las hojas, por lo tanto, los IV son ideales para medir la abundancia de clorofila y la absorción de energía. Por lo anterior, con continuidad se emplean los IV de banda ancha y de reflectancias del rojo e infrarrojo cercano (NIR) (Myneni et al., 1997). Ejemplo de ello son el índice de vegetación radiado (RVI) (Liang & Wang, 2020) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) que es clave para el proceso de modelado en varios cultivos (Duchemin et al., 2006). Las ecuaciones de estos índices son las siguientes:

La materia emite radiación electromagnética debido a la agitación de las moléculas y los átomos, el espectro electromagnético comprende los rayos γ , rayos x , la radiación ultravioleta, la luz, el calor y las ondas de radar. La radiación termal comprende las longitudes de onda de 0.2-1000 μm . El espectro visible se encuentra entre 0.39-0.77 μm y su división espectral considera diferentes colores, violeta (0.390-0.455 μm), azul (0.455-0.492 μm), verde (0.492-0.577 μm), amarillo (0.577-0.597), anaranjado (0.597-0.622 μm) y rojo (0.622-0.770 μm). El espectro de luz ultravioleta abarca tres bandas, la luz ultravioleta cercana (0.3-0.4 μm), la luz ultravioleta lejana (0.2-0.3 μm) y la luz ultravioleta máxima (0.001-0.2 μm). El infrarrojo, también es una porción de la radiación termal que se divide en infrarrojo cercano (0.77-25 μm) e infrarrojo lejano (25-1000 μm) (Iqbal, 1983).

La irradiación en la parte superior de la atmósfera está en función de la distancia entre el sol y la Tierra. Según la distancia promedio entre el sol y la Tierra, la irradiación solar puede ser calculada como (Liang, 2004):

$$E_0 = E_0 \left(1 + 0.033 \cdot \cos \left(\frac{2\pi d_n}{365} \right) \right)$$

En donde, d_n es el número de día en un rango de 1 a 365. Una fórmula más precisa es:

$$E_0 = \underline{E_0} [1.00.00128 \sin \sin x + 0.000719 \cos \cos 2 x + 0.000077 \sin \sin 2 x]$$

En donde $X=2\pi(d_n-1)/365$. Cabe mencionar que la diferencia entre los resultados de ambas fórmulas es insignificante.

Informe final de Proyecto de Investigación

La radiación de onda corta hace referencia a la radiación solar total con longitudes de onda entre 0.3-3 μm . Esta se define de la siguiente manera (Liang & Wang, 2020):

$$I_g = \int_{0.3\mu\text{m}}^{3.0\mu\text{m}} I(\lambda) d\lambda$$

En donde, $I(\lambda)$ es la irradiancia espectral.

La radiación fotosintéticamente activa (PAR) es la radiación con longitudes de onda entre 0.4-0.7 μm . Esta se define como (Liang & Wang, 2020):

$$PAR = \int_{0.4\mu\text{m}}^{0.7\mu\text{m}} I(\lambda) d\lambda$$

La vegetación puede absorber hasta el 95% de la PAR incidente, la cual es transformada en calor latente y sensible. Una fracción menor al 5% es utilizada en procesos fotoquímicos en los cuales el CO_2 es asimilado como C orgánico (Monteith, 1972). La cantidad de PAR absorbida por la vegetación verde (APAR) influencia la productividad primaria, el ciclo del C y el intercambio de energía entre la atmósfera y la superficie de la tierra (Li, 1997). Existen modelos para relacionar el suelo y la atmósfera de manera que simulen las dinámicas entre el ciclo del C y el ciclo del agua global. La mayoría de los modelos usan la fotosíntesis para ajustar los intercambios de la vegetación con el ciclo del carbono y el agua (Liang et al., 2006), siendo la PAR uno de los parámetros de importancia para la creación de estos. Además, es la parte visible de la radiación de onda corta superficial descendente (DSSR), siendo la correlación expresada como (Liang & Wang, 2020):

$$PAR = I_g \cdot \xi$$

En donde I_g es la radiación de onda corta que tiene la superficie, y ξ es el coeficiente para la proporción de PAR en la radiación de onda corta.

Los atributos de la vegetación ocasionan efectos en los ciclos del C, agua, así como en los presupuestos energéticos, ya que controlan los intercambios entre la parte baja de la atmósfera y la parte continental de la biósfera (Carrer et al., 2013). Los cambios en el uso y cobertura de la tierra han conducido a

Informe final de Proyecto de Investigación

emisiones de $1.6 \pm 0.7 \text{ PgC}\cdot\text{año}^{-1}$ en los trópicos, compensado ligeramente por la captura de $1.1 \text{ PgC}\cdot\text{año}^{-1}$ en zonas templadas y boreales (Houghton, 1995). Uno de los factores más importantes en el monitoreo del crecimiento de la vegetación es la fracción de radiación fotosintéticamente activa ($fAPAR$). Este parámetro biofísico caracteriza la energía, masa e intercambios de impulso, por ello, es extensamente utilizado en modelos de transferencia de energía, C, agua y otros aspectos de la biogeoquímica de los ecosistemas (Senna, 2005). La $fAPAR$ es adimensional y estima la cantidad de PAR que es efectivamente absorbida por las plantas, variando entre 0 a 1. Para su estimación solo es útil un limitado rango espectral de irradiancia solar entre 400 a 700 nm (Global Climate Observing System (GCOS), 2011). La $fAPAR$ puede ser calculada como (Liang & Wang, 2020):

$$fAPAR = \frac{(I_{TOC}^{\downarrow} - I_{Ground}^{\downarrow} + I_{Ground}^{\uparrow} - I_{TOC}^{\uparrow})}{I_{TOC}^{\downarrow}}$$

En donde, $I_{TOC}^{\downarrow}$ es el flujo solar entrante, $I_{Ground}^{\downarrow}$ es el flujo a la tierra, $I_{Ground}^{\uparrow}$ es el flujo de la tierra e $I_{TOC}^{\uparrow}$ es el flujo solar saliente.

Las estimaciones confiables de NPP y GPP dependen de que la $fAPAR$ sea exacta, una precisión del 5 o 10 % es considerada aceptable en investigaciones agrícolas o de otras aplicaciones (GCOS, 2011).

La estimación de la $fAPAR$ puede realizarse por métodos de campo, sin embargo, para las estimaciones globales los datos son insuficientes. Los sensores satelitales brindan información a escalas regionales y globales, por lo que, son ideales para el monitoreo de parámetros biofísicos (Liang, 2012). Debido a que la $fAPAR$ está relacionada con la estructura de dosel de la vegetación tal como el LAI el cual es afectado por la luz solar y los ángulos de vista, se han propuesto varios algoritmos empíricos para la estimación de este parámetro. La $fAPAR$ es calculada en función del LAI y el coeficiente de extinción (Ruimy et al., 1994) . La relación empírica entre $fAPAR$ y el LAI es la siguiente (Wiegand et al., 1992):

$$fAPAR = 1 - e^{-LAI}, R^2 = 0.952, RMSE = 0.054$$

Informe final de Proyecto de Investigación

En donde R^2 , es el coeficiente de determinación y RMSE, es la distancia media cuadrática mínima.

La relación entre la PAR transmitida y la recibida por debajo de un dosel, decrece exponencialmente con respecto al LAI, por ello, la $fAPAR$ también puede expresarse como (Casanova et al., 1998):

$$fAPAR = 1 - e^{-K \cdot LAI}$$

En donde, K , es el coeficiente de extinción.

Por otra parte, la $fAPAR$ puede ser obtenida con otros métodos que no requieran precisamente el LAI, sino que empleando relaciones con otros índices de vegetación como el NDVI (Liang & Wang, 2020). Es por ello, que Mynemi et al. (2002), usaron un algoritmo de respaldo en el sensor Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) $fAPAR$, el cual se basa en el algoritmo empírico del NDVI. Este está en función del Índice de Vegetación Mejorado (EVI). La diferencia es que EVI agrega una banda azul basada en la reflectancia del NDVI (Huete, 1997). El Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) corre modelos para simular patrones estacionales como la fijación de C, biomasa, movimiento de nutrientes, mineralización y producción microbiana. En este modelo se empleó el algoritmo de $fAPAR$ que relacionó linealmente el NDVI con el Simple Ratio (SR) de la siguiente forma (Potter et al., 1993):

$$fAPAR = \left(\frac{SR - SR_{min}}{SR_{max} - SR_{min}}, 0.95 \right)$$

En el modelo de producción primaria global (GLO-PEM), la estimación de la $fAPAR$ se consideró como una función lineal del Simple Ratio (SR) (Prince & Goward, 1995):

$$fAPAR = \frac{SR - SR_{min}}{SR_{max} - SR_{min}}$$

$$(fAPAR_{max} - fAPAR_{min})$$

Informe final de Proyecto de Investigación

El índice de vegetación diferenciada (DVI) minimiza la interferencia del suelo y su uso en la vegetación dispersa es mejor, sin embargo, es afectado por las características espectrales y direccionales del dosel. Cuando la reflectancia visible y la reflectancia del infrarrojo cercano se incrementan en la misma proporción el NDVI no cambia, pero el DVI sí. Por lo tanto, el DVI es adecuado para la vegetación dispersa y el NDVI para la vegetación densa. El índice de vegetación renormalizado (RDVI) tiene una correlación lineal con la $fAPAR$ bajo cualquier tipo de cobertura vegetal, sin embargo, se ve afectado por la reflectancia del suelo (Liang & Wang, 2020).

Los índices de vegetación como el NDVI solo determinan parcialmente la $fAPAR$, ya que, esta es afectada por los componentes internos de las hojas como el contenido de clorofila. Este tiene una clara influencia en las estimaciones con sensores remotos, puesto que, a valores iguales de NDVI se presentan valores variables de la $fAPAR$ (Dawson et al., 2003).

Para el logro del objetivo 2, cuantificar la GPP usando el sensor de mediana resolución espacial Sentinel-2 del año 2016 al 2025 en el ecosistema de manglar, se obtuvieron las bases de datos de Copernicus a través de acceso de la plataforma de GEE.

Para cuantificar la GPP aplicado a manglares, se pueden utilizar el modelo vegetal productivo (VPM), y dos IV, considerando las bandas espectrales del sensor Sentinel-2, siendo estos el Índice Mejorado de Vegetación (EVI) y el Índice de agua superficial terrestre (LSWI). El EVI esta correlacionado directamente con el índice de verdor de las hojas en los datos multiespectrales, siendo sensible a las variaciones del dosel de la vegetación, para este caso del manglar, (Xiao et al., 2004). El EVI emplea una banda azul adicional para la corrección atmosférica y la reflectancia variable del fondo del suelo, y del dosel calculándose así a partir de las bandas azul, roja y el infrarrojo cercano, NIR., siendo los valores de los índices entre -1 y $+1$ (As-syakur et al., 2010), generados a través de las siguientes ecuaciones.

$$EVI = 2.5 [bNIR - bRoja / (bNIR(6 \times bRojo - 7.5 \times bAzul) + 1)]$$

$$LSWI = bNIR - bSWIR / bNIR + bSWIR$$

Informe final de Proyecto de Investigación

Siendo las bandas bNIR, el infrarrojo cercano; bSWIR, la onda corta del infrarrojo; bRojo, la banda roja y bAzul, la banda del azul.

Considerando que la vegetación del dosel está compuesta por plantas fotosintéticamente activas (PAV), a través de sus cloroplastos, y plantas no fotosintéticamente activas (NPV), principalmente ramas y tallos. Con base en el concepto de PAV y NPV, se aplica el modelo de Monteith para estimar el valor de GPP (Xiao et al., 2005). Siendo su ecuación: $GPP = \varepsilon * fPAR * PAR$

ε , la eficiencia de uso de luz expresada en $g \cdot MJ^{-1}$, la cual se ve afectada por la temperatura, el agua y la fenología de las hojas, que se define en la siguiente ecuación

$$\varepsilon_g = \varepsilon_0 \times T_{\text{escalar}} \times W_{\text{escalar}} \times P_{\text{escalar}}$$

La eficiencia máxima de la luz utilizada en esta investigación es igual a 0.40 gC mol^{-1} (HIRANO et al., 2007), siendo su equivalente de $1.83 \text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-2}$.

T_{escalar} , son valores de temperatura, W_{escalar} son valores de agua y P_{escalar} son valores de fenología de las hojas, siendo lo necesario para determinar el efecto de la edad de las hojas en la fotosíntesis a nivel del dosel.

El cálculo del valor P_{escalar} depende de la longevidad de las hojas (caducifolias, hojas verdes todo el año). Para un dosel dominado por hojas con una expectativa de vida de un año, P_{escalar} se calcula utilizando dos fases distintas como una función lineal (Yuan et al., 2014). Para el caso de los bosques de manglar, el valor P_{escalar} a utilizar es 1, debido a que la vegetación permanece verde durante todo el año.

T_{escalar} es un parámetro utilizado para representar la temperatura fotosintética. Utilizando la siguiente ecuación, desarrollada por el Terrestrial Ecosystem Model. (Xiao et al., 2004)

$$T_{\text{escalar}} = (T - T_{\text{min}}) \times (T - T_{\text{max}}) / [(T - T_{\text{min}}) \times (T - T_{\text{max}}) - (T - T_{\text{top}})^2]$$

Informe final de Proyecto de Investigación

Siento T la temperatura media; T_{min} , la temperatura mínima; T_{max} , la temperatura máxima; y T_{op} , la temperatura optima del manglar, 28 °C.

Wescalar es el parámetro que se utilizan para conocer el efecto del agua en la fotosíntesis de la vegetación, (Xiao et al., 2005). La ecuación utilizada para calcular Wescalar fue la siguiente:

$$Wescalar = 1 + LISW / 1 + LISW_{max}$$

Donde el valor $LISW_{max}$ es el valor $LISW$ máximo en temporadas de crecimiento, para píxeles individuales.

En el modelo VPM, se supone que $fPAR_{chl}$ en la fotosíntesis es una función lineal de EVI y el coeficiente A se establece en 1,0 (Xiao et al., 2005).

$$fAPAR_{chl} = EVI \times A$$

4. Planteamiento del problema

Los estudios e investigaciones realizadas en Guatemala con respecto al C azul en bosques de manglar han sido muy puntuales en áreas o años específicos, los cuales se han limitado a cuantificar los reservorios de carbono en el ecosistema de manglar, tal es el caso de la "Estimación del contenido de carbono en el componente arbóreo en el Pacífico de Guatemala, reportando para el año 2012, 2,058,789.70 Mg en 17,670.56 ha de cobertura de manglar (Aceituno et al., 2016).

El instituto Nacional de Bosques (INAB), a través de su geoportal, muestra el monitoreo multianual desde el 2011 al 2024 en varios sitios, a través de la implementación gradual de 49 parcelas permanentes de monitoreo forestal (PPMF) de 500 m² y distribuidas espaciadamente en los litorales pacífico y atlántico de Guatemala, las cuales muestran la acumulación de la biomasa en la parte aérea y subterránea. (Instituto Nacional de Bosques, 2024). Se reportan las tendencias del carbono 2011 a

Informe final de Proyecto de Investigación

2024, pero no contando con un monitoreo constante de cada PPMF, ya que el proceso de implementación ha sido paulatino y en algunos casos no existen monitoreos anuales consecutivos, reportándose desde 2 hasta n, variando el número parcelas. Aunado con esto la falta de representatividad en otras partes por la densificación ideal esperada.

Siempre relacionado con la cuantificación en el ecosistema de manglar como reservorios de C, en el año 2023, en el área denominada Las Lisas – La Barrona, a través del monitoreo de 8 PPMF, se especializaron los datos de cada parcela cuantificándose en una cobertura de mangle de 1698 ha, en la parte de raíces y arbóreo superior, 205128.11 Mg de C (Manzo et al., 2024). Al usar la metodología de parcelas, permite tener un dato lo más cercano a la realidad, pero solo en los 500 m² y sus cercanías, sobrestimando o subestimando al interpolar donde no hay representación espacial adecuada entre PPMF.

Si bien todos los trabajos realizados anteriormente han permitido conocer de alguna manera la acumulación de C en el ecosistema de manglar como sumidero, ningún trabajo en el país ha reportado las tasas de absorción de CO₂ de la atmósfera hacia el ecosistema de manglar a lo largo de los años, lo cual se puede realizar por medio de la cuantificación de la GPP, pudiéndose usar para la estimación los sensores remotos.

Lo anterior no significa que no existan datos estimados de la GPP en Guatemala, estando estos disponibles a través de los productos a nivel mundial de NASA Earth Observing System del sensor MODIS, cada 8 días, desde el año 2000 al presente, compuesto con valores de imágenes en píxeles de 500 m, basados en datos de PAR y usos eficientes de luz por parte de la vegetación, con potenciales para el uso de análisis del ciclo del C, energía y agua (Wang, 2021).

Si bien existen datos de GPP a altas resoluciones temporales, cada 8 días del sensor MODIS, pero con resoluciones espaciales bajas de 500 m, estas representaciones espaciales bajas, pueden abarcar o discriminar áreas más allá de los límites reales de la cobertura de manglar, así como si los bosques de manglar son densos o dispersos. Para suplir estas deficiencias, se usaron otros productos de mayor resolución espacial como el satélite Sentinel-2, teniendo este una resolución espacial de 10 m y

Informe final de Proyecto de Investigación

resolución temporal de 5 días de datos de todas sus bandas espectrales, de las cuales se procesan los índices de vegetación. Usando el complemento de datos climáticos de estaciones meteorológicas y el uso de otras variables como temperaturas se generaron las series temporales de GPP, con una resolución más detallada y precisa para cuantificar las absorciones del CO₂ atmosférico.

5. Objetivos

General

Establecer el valor de fijación multianual de carbono atmosférico por el ecosistema de manglar Las Lisas - La Barrona a través de la Producción Primaria Bruta usando datos satelitales.

Específicos:

1. Establecer las mejores fuentes satelitales de Observación de la Tierra (EO), de radiación fotosintéticamente activa (PAR), como variable para la cuantificación de la producción vegetal primaria Bruta (GPP) validados con datos de piranómetros in situ.
2. Cuantificar del 2016 al 2025 la producción vegetal primaria bruta (GPP) a través del sensor de mediana resolución espacial Sentinel-2, datos de estaciones meteorológicas y PAR de fuentes de EO en el ecosistema de manglar Las Lisas - La Barrona.
3. Comparar los resultados de la GPP multianual obtenidos para el ecosistema de manglar Las Lisas - La Barrona con datos de las colecciones de Imágenes de Espectroradiómetros de Mediana Resolución (MODIS).

Informe final de Proyecto de Investigación

6. Hipótesis

Las técnicas de teledetección para estimar la producción primaria bruta, usando productos de Sentinel-2 y subproductos de datos de observación de la tierra, permiten obtener resultados mejorados en comparación con los generados con datos del sensor MODIS.

Las series multianuales de GPP de MODIS no difieren significativamente con los datos estimados con Sentinel-2 y de estaciones meteorológicas

7. Método

7.1. Tipo de investigación.

La investigación fue de tipo aplicada ya que, con la cuantificación de la GPP, se determinó la importancia de los manglares como sumideros de gases de efecto de invernadero atmosférico. Por aparte se estableció un proceso replicable en otras áreas de cobertura del manglar en el pacífico de Guatemala. Esta investigación consideró metodologías de otras publicaciones, algunas aplicadas al ecosistema de manglar y en otros tipos de bosques. Con lo cual estableció una línea base de monitoreo de absorción de carbono asociado al manglar en el área Las Lizas – La Barrona.

En complemento los resultados de la investigación de la GPP a escala media se validaron indirectamente con datos históricos de GPP a nivel global a escala pequeña de los productos MODIS (MOD17A2HGF), para que la metodología tenga sustento para extenderla a nivel nacional.

7.2. Enfoque y alcance de la investigación.

El enfoque de la investigación es cuantitativo, debido a que se consideró en la investigación, medir y analizar el comportamiento a lo largo de 10 años la GPP, la cual se expresa con la dimensional $g \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$, resultados que están en función de las variables para estimar la GPP como lo es el uso eficiente de luz (ϵ), en $gC \cdot MJ^{-1}$, así como la radiación fotosintéticamente activa (PAR) $MJ \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$ y por $año^{-1}$, y la fracción de PAR ($fAPAR$), en valores entre 0 y 1.

Informe final de Proyecto de Investigación

La GPP tuvo un alcance combinado, siendo exploratorio por una parte, debido a que identifico aspectos que no se han estudiado en ecosistemas de manglar en Guatemala en cuanto a las absorciones, generando la línea base para entender su comportamiento; descriptivo ya que se estableció el tasas de las observaciones de CO₂ atmosférico; y correlacional, porque examino como las variables de ϵ , PAR y $fAPAR$ están relacionadas entre sí y cómo varían conjuntamente, ya que se realizaron análisis estadísticos aplicando el coeficiente de determinación para hacer intercomparaciones entre datos globales preexistentes de fuentes de la PAR y de los resultados de GPP con los disponibles de MOD17A2HGF .

7.3. Diseño de la investigación.

El diseño de la investigación es cuantitativo no experimental, debido a que no se manipulo ninguna de las variables (PAR, índices de vegetación de las bandas espectrales como el EVI y EL LSWI, y datos meteorológicos como temperatura y radiación incidente en la tierra), porque no se intervino y controlo ningún entorno. Únicamente se usaron datos para medir y analizar las variables tal como se descargaron de las distintas fuentes de EO. Lo que se realizó, fue la sistematización lógica para los análisis espaciales y describir el comportamiento del fenómeno de absorción de C atmosférico por parte de los bosques de manglar de Las Lisas – La Barrona, así como las relaciones entre los productos generados y su consulta libre disponibles en la Web, lo cual no estableció causalidad directa.

7.4. Población, muestra y muestreo.

La población de la investigación fue circunscrita al ecosistema Las Lizas – La Barrone, de 6019 ha, en donde convergen bosques de manglar con las especies como *Rizophora Mangle*, *Laguncularia racemosa* y *Avicennia Germinans*, con una cobertura de 2102 ha para el 2025, siendo esta la población total de cobertura de manglar sobre la cual se centró el análisis de la cuantificación de absorción de carbono atmosférico.

Informe final de Proyecto de Investigación

Con relación a la temporalidad, se analizó cómo ha sido la captación de carbono por procesos fotosintéticos a lo largo de 10 años, desde el 2016 al 2025, debido a que en este periodo están disponibles los datos del satélite Sentinel-2, con un intervalo de 5 días de periodo entre cada fecha de revisita, por lo que las series temporales fueron robustas, considerando también los datos menos de 73 imágenes por año debido que algunas imágenes presentaron nubosidad en el momento de la captura de las imágenes por el satélite, siendo no posible obtener la reflectancia del espectro visible e infrarrojos. De las imágenes Sentinel-2, se usó principalmente las bandas espectrales del azul, rojo, infrarrojo cercano y el infrarrojo cercano de onda corta.

Para el objetivo 1, los datos de PAR (300 a 700 nm), se consideraron los mejores datos diarios de por lo menos 5 años, de las fuentes de GOES, MODIS y ERA-5, comparados con los datos de radiancia por piranómetro de las 3 estaciones meteorológicas cercanas al área de Las Lisas – La Barrona, y 2 estaciones ubicadas en Mexico. Al establecer la mejor fuente de datos de PAR, se usaron series temporales del 2016 al 2025, como variable de entrada para el cálculo de la GPP.

La consulta y descarga de datos de PAR se obtuvieron de las siguientes fuentes:

Los datos de radiación del Geostationay Satellite Server (GOES), se realizó desarrollando líneas de comando a través de la plataforma Google Colab. (Google, 2024).Apéndice 1.

Los productos de ERA5-Land (ERA-5), son un conjunto de datos de reanálisis que proporciona una visión coherente de la evolución de las variables terrestres a lo largo de varias décadas. ERA-5 continuamente está reproduciendo el componente terrestre del reanálisis climático ERA5 del ECMWF. El reanálisis combina datos de modelos con observaciones de todo el mundo en un conjunto de datos globalmente completo y coherente que utiliza las leyes de la física. Se producen datos que se remontan a varias décadas, lo que proporciona una descripción precisa del clima del pasado. Este conjunto de datos incluye 50 variables disponibles dentro de las cuales se encuentra la PAR, a través de su variable `surface_net_solar_radiation_sum` (Muñoz, 2019).

Informe final de Proyecto de Investigación

La cantidad de radiación térmica (también conocida como de onda larga o terrestre) emitida por la atmósfera y las nubes que llega a la superficie de la Tierra. La superficie de la Tierra emite radiación térmica, parte de la cual es absorbida por la atmósfera y las nubes. La atmósfera y las nubes también emiten radiación térmica en todas las direcciones, parte de la cual llega a la superficie (representada por esta variable). Esta variable se acumula desde el inicio del tiempo de pronóstico hasta el final del paso de pronóstico. Las unidades son julios por metro cuadrado ($J \cdot m^{-2}$).

La descarga de los datos de la variable de radiación solar de fuente ERA-5, se realiza por medio del algoritmo usando la plataforma Google Earth Engine (GEE), Apéndice 1:

La tercera fuente de radiancia, son los datos procesados de MCD18A1 versión 6.1 y 6.2, que son productos de Terra y Aqua de nivel 3 en cuadrícula de radiación de onda corta descendente (DSR) combinado con espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) que se produce diariamente con una resolución de píxel de 1 kilómetro con estimaciones de DSR cada 3 horas.

La DSR es la radiación solar incidente sobre superficies terrestres en el espectro de onda corta (300-4000 nanómetros) y es una variable importante en los modelos de superficie terrestre que abordan una variedad de cuestiones entre ellas la estimación de la GPP.

Los productos MCD18 se basan en un algoritmo de creación de prototipos que utiliza firmas multitemporales de datos MODIS para derivar la reflectancia de la superficie y luego calcular la DSR incidente utilizando el enfoque de tabla de consulta (LUT). Las LUT consideran diferentes tipos de cargas de aerosoles y nubes en una variedad de geometrías de iluminación/visualización. Los productos DSR globales se generan a partir de datos MODIS y de satélites geoestacionarios.

Para el análisis de la GPP, no es necesario un tamaño muestral, ya que se usaron los datos diarios de PAR y las imágenes disponibles de Sentinel-2 con intervalos de cada 5 días, esperando idealmente 73 imágenes por año, a partir del 2016 al 2025, realizando interpolaciones entre fechas de escenas, ya que las estimaciones de GPP anual dependen de la acumulación de GPP diaria.

Informe final de Proyecto de Investigación

7.5. Técnicas.

Objetivo 1:

Se identificaron las fuentes de datos de radiación de los distintos programas de observación de la tierra, los cuales ya tienen productos de reflectancia de la radiación total solar que llega a la superficie del suelo (DWSR) y de PAR, los cuales están preprocesados y corregidos atmosféricamente, y pueden consultar en el apéndice 1.

En el caso de datos de la variable radiancia de fuentes de piranómetros, se hizo la requisición de los datos diarios del 2016 al 2025 de 3 estaciones meteorológicas del Instituto de Cambio Climático (ICC), así como de la variable de temperaturas, mínimas, medias y máximas. (Instituto de Cambio Climático, 2024)

Para los datos de radiancia con alta exactitud, capturados en estaciones de radiación, se obtuvieron de dos locaciones ubicadas en México, siendo una en la Universidad Autónoma de México (UNAM), siendo la serie de datos del 2018 al 2024 disponibles en el Word Radiation Data Centre (World Meteorological Organization [WRDC], 2025).

La segunda serie de datos de exatitud, fue de la estación de radiación Selegua, Comitansillo México, datos disponibles en el WRMC (Baseline Surface Radiation Network, 2025), siendo la serie para los años 2020 a 2024

Con el objetivo de establecer la mejor fuente de datos PAR, se realizó un análisis de proporcionalidad de variación, aplicando el coeficiente de determinación o R^2 , siendo sus valores esperados entre 0 y 1, donde valores más cercanos a 1 significa un buen ajuste del modelo, o para este caso un buen ajuste del modelo aplicado para el cálculo de PAR de las fuentes GOES, ERA 5 y MODIS, en comparación los datos de piranómetro.

Informe final de Proyecto de Investigación

En complemento se calculó el Error Medio Sgado (MBE), el cual mide el sesgo promedio entre los valores predichos y observados, lo que indica si el modelo esta sobreestimado o subestimado. Se obtuvo también la Raiz del error Cuadrático Medio (RSME), que mide el promedio de las diferencias cuadráticas entre los valores observados y predichos. Penaliza los errores grandes más que los pequeños, debido a la elevación al cuadrado. Em complemento, se calculó el Error Absoluto Medio (MAE), que establece el promedio de las diferencias absolutas entre los valores observados y predichos.

El análisis de los estadísticos entre las fuentes de EO y los piranómetros, permite establecer cuales es la mejor fuente de PAR para las latitudes de Las Lisas – La Barrona, y por consiguiente para las estimaciones de la GPP.

Objetivo 2:

Para la obtención de GPP se aplicó la fórmula de Monteith ($GPP = \epsilon f_{APAR} PAR$), usando como herramienta de consulta de datos espacial y productos de GPP, Google Earth Engine (GEE), que es una plataforma en la nube desarrollada por Google que permite el análisis y procesamiento de grandes cantidades de datos geoespaciales. Está diseñada principalmente para el monitoreo ambiental, análisis geoespacial y modelado de datos a nivel global.

Los datos requeridos para aplicar la fórmula de Monteith se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de la aplicación de la fórmula de Monteith para el cálculo de GPP.

Variable / dimensional	Formulas o datos directos	Fuentes o procesos
PAR, $Mj \cdot m^2$	GOES, ERA 5, o MODIS	Resultados objetivo 1
f_{APAR} , valores adimensionales entre 0 y 1	Desarrollo de los índices de vegetación mejorado EVI , $EVI = 2.5 [bNIR - bRoja / (bNIR(6 \times bRoja - 7.5 \times bAzul) + 1)]$	Procesamiento de los datos Sentinel-2, series temporales de consulta del programa Copernicus.
ϵ , $g \cdot MJ^{-1}$	$\epsilon_g = \epsilon_0 \times Tescalar \times Wescalar \times Pescalar$.	Procesamiento de los datos Sentinel-2, series temporales de consulta del programa Coopernicus, para el cálculo de LISW.

Informe final de Proyecto de Investigación

	$T_{escalar} = (T - T_{min}) \times (T - T_{max}) / [(T - T_{min}) \times (T - T_{max}) - (T - T_{op})^2]$ $W_{escalar} = 1 + LISW / 1 + LISW_{max}$	Las temperaturas se obtuvieron de la red de estaciones meteorológicas del ICC.
GPP, $Mg\ m^{-2}\ año^{-1}$	$GPP = \epsilon f_{APAR} PAR$	

Objetivo 3:

Para la validación indirecta de los resultados esperados de GPP del objetivo 2, con los datos de subproductos de MODIS, se hizo una comparación los valores de píxel de los ráster de cada año de GPP, de los productos de Sentinel-2 y de MOD17A2HGF. Se aplicó estadística descriptiva para comparar la variabilidad entre conjuntos de datos del mismo año, aplicando cajas de dispersión, usando la herramienta de geoestadística del software de QGIS.

7.6. Resumen de las variables o unidades de análisis.

Tabla 2. Variables y unidades de análisis.

Objetivo específico	Variable	Instrumentos	Unidad de medida o cualificación
Establecer las mejores fuentes satelitales de Observación de la Tierra (EO), de radiación fotosintéticamente activa (PAR), como variable para la cuantificación de la producción vegetal primaria Bruta (GPP) validados con datos de piranómetros in situ.	Radiación fotosintéticamente activa (PAR)	Ambiente en la nube Google Earth Engine para consultar y descargar los datos de MODIS y ERA 5. Ambiente en la nube, Colab para consultar y descargar datos GOES. Ordenación de datos en Excel. Análisis estadístico (R^2) de series temporales de PAR usando el software Matlab.	$Mj \cdot m^2$ Series temporales diarias de 2 años de comparación entre fuentes EO y piranómetro.
Cuantificar del 2015 al 2024 la producción vegetal primaria bruta	Producción primaria bruta (GPP)	Ambiente en la nube Google Earth Engine para usar las fuentes de	$Mg\ C \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$

Informe final de Proyecto de Investigación

(GPP) a través del sensor de mediana resolución espacial Sentinel-2, datos de estaciones meteorológicas y fuentes de Observación de la Tierra (EO) en el ecosistema de manglar Las Lisas-La Barrona.		datos de PAR, procesar los índices de vegetación (Fapar) y uso eficiente de la luz (E) y descargar los datos de PAR Análisis y salida de mapas y gráficos de series temporales de GPP usando el software Matlab.	Series temporales de 9 años de carbono absorbido por los bosques de manglar.
Comparar los resultados de la producción vegetal primaria bruta (GPP) multianual obtenidos para el ecosistema de manglar Las Lisas-La Barrona con datos de las colecciones de GPP de MODIS.	Producción primaria bruta (GPP) calculada y GPP de colecciones mundiales de productos MODIS	Ordenación de datos en Excel. Análisis estadístico (R^2) de series temporales de GPP usando el software Matlab.	Coefficiente de determinación entre 0 y 1, para establecer el ajuste de las estimaciones de PAR

7.7. Procesamiento y análisis de la información.

Las principales actividades realizadas respecto al objetivo 1 comprendieron: Comparar los datos diarios del 2019 al 2025 de la PAR calculados a partir de los registros de las estaciones de irradiancia solar con los datos calculados de PAR de las fuentes satelitales de EO coincidentes con las ubicación de las estaciones, siendo el Geostationay Satellite Server (GOES), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) y los productos de ERA-5 que es una serie de productos de reanálisis del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), los cuales se compararon y validaron con los datos de estaciones meteorológicas.

La radiación solar fue medida en un lugar en específico a través de un piranómetro, que mide la radiación solar global (GHI) incidente en un rango de longitud de onda de aproximadamente 0.3 μm a 3 o 4 mm, dependiendo del diseño y los sensores. (ISO 9060, 2018)(ISO 9060, 2018). Los modelos utilizados para medir la radiación in situ en Guatemala fueron el SP Lite2 (Kipp & Zonen, 2013) ; Vantage pro 2 DS6450, y S-LIB-M003 (ONSET, 2015), y en México el Kipp & Zonen en su modelos CPM22, CPM21 (Kipp & Zonen CMP, 2018). Tabla 3 y Figura 2.

Informe final de Proyecto de Investigación

Para obtener los datos de radiancia en el área de Las Lisas – La Barrona, se seleccionaron las tres estaciones más cercanas de la red del Instituto de Cambio Climático (ICC, 2024), ubicadas a una distancia de 17, 23 y 36 km, respectivamente. A partir de los registros de sus piranómetros para el periodo 2018-2025, se calculó la irradiancia promedio diaria en $W \cdot m^{-2}$. Estos valores se transformaron a irradiación diaria en $MJ \cdot m^{-2}$ mediante su integración temporal (multiplicando por los 86,400 segundos del día), asumiendo que el 46% de dicha energía corresponde a la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR), Figura 2.

Tabla 3. Especificaciones de los piranómetros.

Sensor model	Measurement range ($W \cdot m^{-2}$)	Rango espectral (nm)	Sensibilidad ($\mu V \cdot W^{-1} \cdot m^2$)	Incertidumbre medición (%)	Estación	Coordenadas
SP-Lite2	0 – 2000	400 – 1100	60 – 100	± 2	La Máquina y Trinidad Magdalena	-90.3314643, 13.8986219 y -90.2582364, 13.9320623
Vantage Pro2 DS6450	0 – 1800	400 – 1100	ND	ND	La Candelaria (until 2021)	-90.5593982, 13.9122857
S-LIB-M003	0 – 2000	300 – 1100	ND	± 2	La Candelaria (from 2022)	-90.5593982, 13.9122857
CPM22	0 – 2000	245 – 2100	7 – 14	± 0.2	Selegua	-91.990174, 15.784016
CPM21	0 – 2000	285 – 2800	7 – 14	± 0.2	UNAM	-99.1983333, 19.3336111

En el caso de las estaciones de México, en la UNAM, se obtuvieron los datos del 2018 al 2024 del Word Radiation Data Centre (World Meteorological Organization, 2025), de la de la irradiación global diaria en $J \cdot cm^{-2}$, que se transformó a $MJ \cdot m^{-2}$, y de este valor el 46 % corresponde a la PAR, Tabla 4 y ubicación, Figura 2.

Para la Estación Selegua, Comitansillo México, los datos de irradiancia de onda corta, se obtuvieron del World Radiation Monitoring Center (WRMC), (Baseline Surface Radiation Network, 2025), siendo los datos disponibles para los años 2020 a 2024, de cada día y a cada minuto en $w \cdot m^{-2}$, de los

Informe final de Proyecto de Investigación

cuales se integraron los registro diurnos de cada minuto para obtener la irradiación. Estos se convirtieron en $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$, multiplicando por 60 s. de cada min., y aplicando el 0.46 como factor de PAR. La Tabla 4, muestra los valores de irradiancia, irradiación y el cálculo de la PAR, además de su ubicación, Figura 2.

Figura 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas en Guatemala y de irradiancia en Mexico, según tipo de piranómetros.

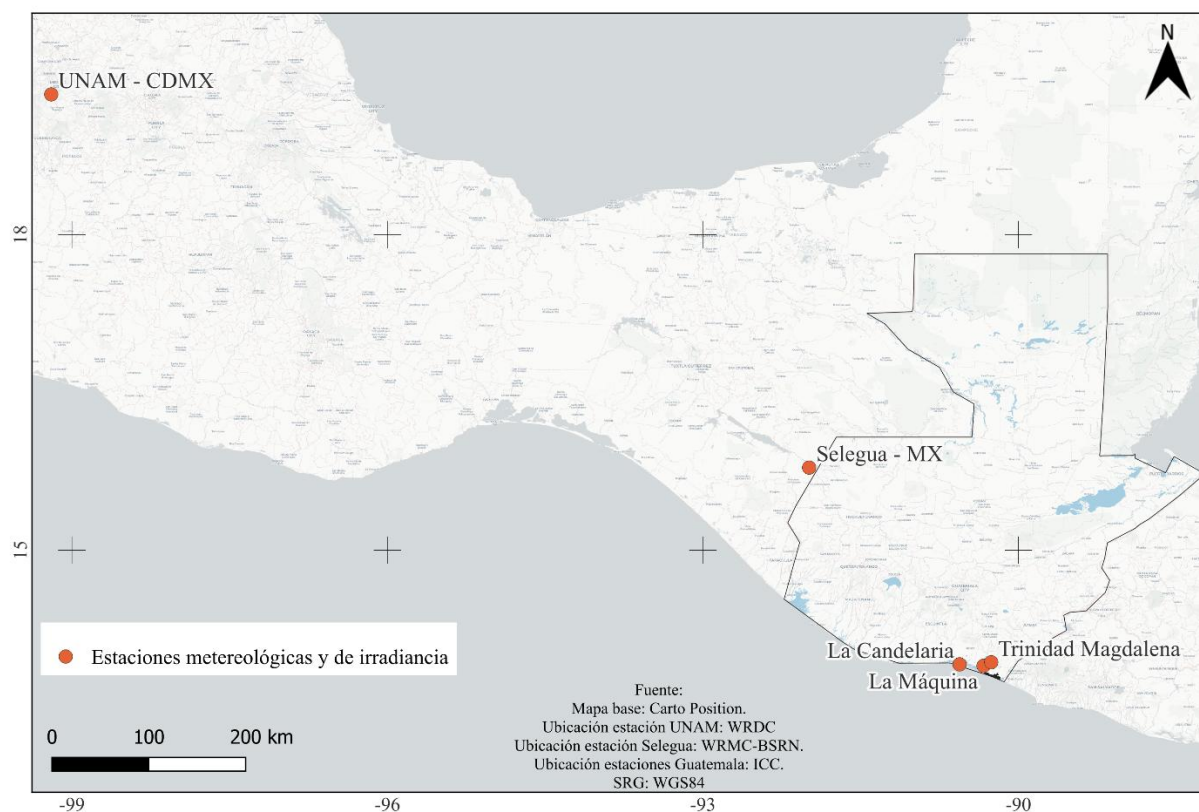


Tabla 4. Ejemplo de cálculo de la PAR a partir de datos de radiación de piranómetro, UNAM.

Fecha	H_{diaria} ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$) UNAM	PAR de H_{diaria} (MJ m^{-2})	$\frac{H}{H}$ Selegua (W m^{-2})	PAR de $\frac{H}{H}$ (MJ m^{-2})
9/1/2020	2838	13.05	448027	12.37
9/2/2020	2811	12.93	425894	11.75
9/3/2020	2606	11.99	235295	6.49
9/4/2020	1291	5.94	404419	11.16

Informe final de Proyecto de Investigación

El activo ERA5-Land Daily Aggregated (ECMWF) es un agregado diario de activos horarios terrestres que incluye bandas de flujo y de no flujo. Las bandas de flujo se forman recopilando los datos de la primera hora del día siguiente, que contienen la suma agregada del día anterior, mientras que las bandas de no flujo se crean promediando todos los datos horarios del día. Las bandas de flujo usadas para la cuantificación de la PAR fue el producto `surface_solar_radiation_downwards_sum`. (Muñoz, 2019).

Las dimensionales de la radiación en la superficie es $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$, siendo la DSSR la cantidad de radiación solar que llega a la superficie de la Tierra (conocida como radiación de onda corta). Esta variable comprende tanto la radiación solar directa como la difusa. La descripción del ERA-5 Land se muestra en la Tabla 5. (Muñoz, 2019). La Tabla 6, muestra el ejemplo de cálculo de la PAR, 0.46 de DSSR a partir de los datos de radiación que llegó a la superficie terrestre en cada una de las 5 ubicaciones de las estaciones de piranómetros, pasando de $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ a $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ y aplicando el factor de 0.46

Tabla 5. Descripción de los datos ERA5-Land.

Dato	Descripción
Tipo de dato	En cradícula
Proyección	Regular latitud - longitud g
Cobertura horizontal	Global
Resolución horizontal	0.1° x 0.1°; Nativo de 9 km.
Cobertura vertical	de 2 msnm, a una profudidad del suelo de 289 cm.
Vertical resolution	4 levels of the ECMWF surface model: Layer 1: 0 -7cm, Layer 2: 7 - 28cm, Layer 3: 28-100cm, Layer 4: 100-289cm Some parameters are defined at 2 m over the surface.
Cobertura temporal	enero 1950 al presente
Resolución temporal	Cada hora
Formato del archivo	GRIB
Frecuencia de actualización	Daily

Tomado de: (Climate Data Store, 2024)

Tabla 6. Ejemplo, cálculo de la PAR a partir de DSSR para ERA5.

PAR ERA-5 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$		
Fecha	ERA-5 $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$	
01/01/2022	19125724	8.80
01/02/2022	19403904	8.93
01/03/2022	18336172	8.43
01/04/2022	17848036	8.21

Informe final de Proyecto de Investigación

Las versiones MCD18C20.061 y MCD18C20.062 es un producto de nivel 3, previamente procesado, en cuadrícula de radiación fotosintéticamente activa (PAR) Terra y Aqua combinado con espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) que se produce diariamente con una resolución de 0.05 grados (5600 m en el ecuador) con estimaciones de PAR cada 3 horas, es decir, proporciona valores de PAR promedio a lo largo de 3h, en $W \cdot m^{-2}$. Tabla 7.

Los datos MCD18 se basan en un algoritmo de creación de prototipos que utiliza firmas multitemporales de datos MODIS para derivar la reflectancia de la superficie y luego calcular la PAR incidente utilizando el enfoque de tabla de consulta (LUT). Las LUT consideran diferentes tipos de cargas de aerosoles y nubes en una variedad de geometrías de iluminación/visualización (Wang, 2021). Para el caso de EO de los subproductos de MODIS, tanto para las versiones 061 y 062, los valores de PAR diaria se obtienen de los valores directos de radiación de PAR del acumulado de 8 promedios de cada 3 h ($W \cdot m^{-2}$) multiplicando por 10800 segundos, correspondiente a cada 3 h y dividiendo por 1×10^6 , para obtener $MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$ acumulado, Tabla 8.

Tabla 7. Bandas de PAR, MCD18C2.061 Dayly 3-Hours

Banda	Descripción
GMT_0000_PAR	Total PAR at GMT 00:00
GMT_0300_PAR	Total PAR at GMT 03:00
GMT_0600_PAR	Total PAR at GMT 06:00
GMT_0900_PAR	Total PAR at GMT 09:00
GMT_1200_PAR	Total PAR at GMT 12:00
GMT_1500_PAR	Total PAR at GMT 15:00
GMT_1800_PAR	Total PAR at GMT 18:00
GMT_2100_PAR	Total PAR at GMT 21:00

Tabla 8. Ejemplo del cálculo de la PAR de subproductos MODIS MCD18C2.061 y .062.

Fecha	PAR .061 promedio 3h ($W \cdot m^{-2}$)	PAR PAR .061 diaria ($MJ \cdot m^{-2}$)	PAR .062 promedio 3h ($W \cdot m^{-2}$)	PAR PAR .062 diaria ($MJ \cdot m^{-2}$)
01/01/2022	826.816	8.9296128	855.887	9.2435796
01/02/2022	861.848	9.3079584	887.965	9.590022
01/03/2022	179.164	1.9349712	259.411	2.8016388
01/04/2022	656.747	7.0928676	706.71	7.632468

El producto radiación de onda corta descendente de superficie (DSR) de GOES (GOES 16 Downward Shortwave Radiation: Surface Product), contiene una imagen con valores de píxeles que identifican la

Informe final de Proyecto de Investigación

irradiancia (flujo) total instantánea de onda corta recibida en la superficie de la tierra integrada sobre el paso de banda de longitud de onda de 0.2 a 4.0 μm . El producto incluye información sobre la calidad de los datos que proporciona una evaluación de los valores de los datos de radiación de onda corta descendente, incluye una indicación de buena calidad, degradada o no válida. (NOAA, 2019)

Las imágenes de los productos GOES se producen en 3 formas, una cuadrícula de latitud y longitud global con una resolución de 0,5 grados para el disco completo, 0.25° para CONUS y 0.05° para las regiones de cobertura de mesoescala. Los datos de los productos se generan para datos de origen geolocalizados con ángulos cenitales locales de 90° y ángulos cenitales solares de 90° (NOAA, 2019).

Para la descarga en los 5 puntos de las estaciones y el análisis de los datos de GOES DSRS, tanto en México como en Guatemala, se usó el producto de disco completo, correspondiente al rango de 0 a 1500 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, con una exactitud de 85 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ en el extremo superior, con precisión de 100 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, y resolución espacial de 4 km. (GOES-R, 2017).

Los valores descargados corresponden al flujo medio horario de irradiancia de onda corta incidente en la superficie, expresado en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. La radiación acumulada diaria se estimó multiplicando cada valor horario por 3600 s (equivalente a una hora) para obtener la energía por unidad de superficie ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$), y posteriormente sumando los 24 intervalos horarios del día. Los valores diarios fueron convertidos a $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$. Para la estimación de la PAR, se aplicó un factor de conversión de 0.46. Tabla 9.

Tabla 9. Ejemplo Cálculo de la PAR de subproductos GOES-16- ABI-L2-BRFC.

Fecha	PAR promedio 1h ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	PAR diaria ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)
01/01/2022	4993.88	8.270
01/02/2022	7105.07	11.766
01/03/2022	5904.73	9.778
01/04/2022	6289.08	10.415

Para establecer la mejor fuente de PAR, por medio del software de MatLab, se procedió a calcular los coeficientes de determinación y las gráficas de correlación entre los datos de piranómetro de cada una de las 5 estaciones con cada uno de los productos de ERA-5, MODIS y GOES. Se obtuvo el modelo

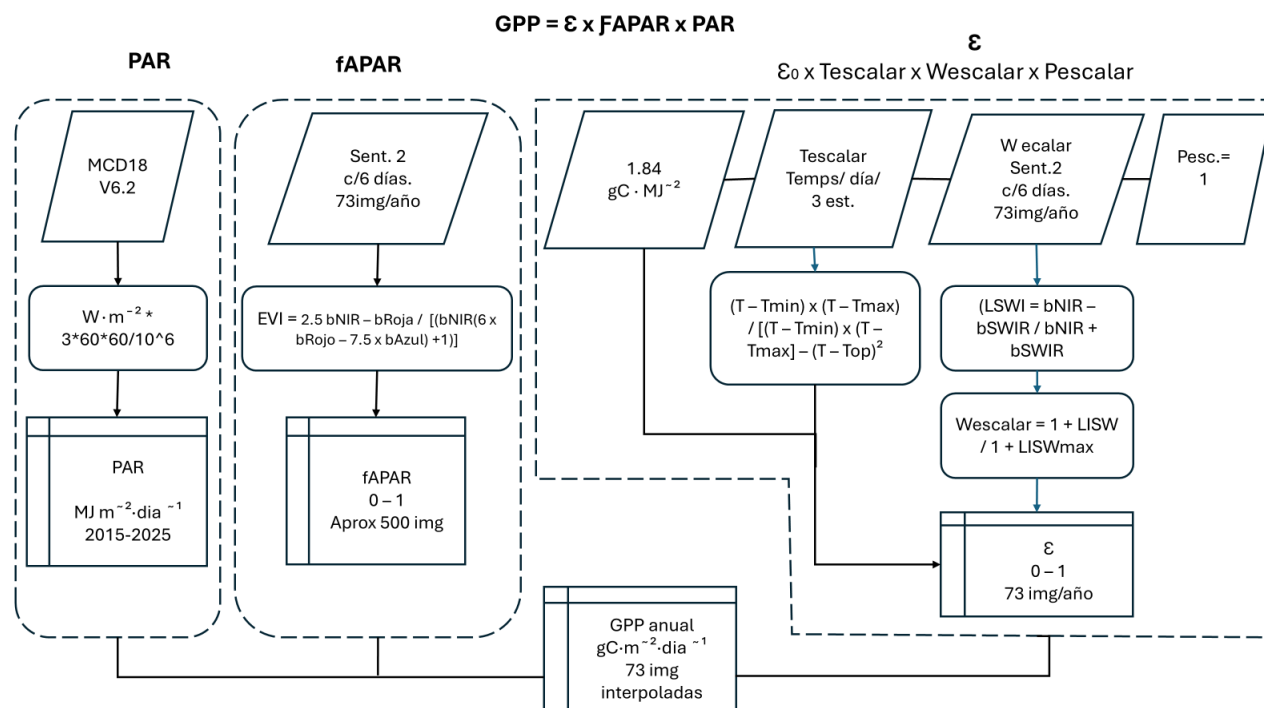
Informe final de Proyecto de Investigación

de correlación lineal, el cálculo la pendiente y el coeficiente de determinación (R^2), lo cual permitió establecer la robustez de la predicción de los datos observados.

En complemento, se calcularon las métricas estadísticas, siendo estas: el error medio cuadrático (RMSE), que mide la magnitud promedio de los errores entre las predicciones y los valores reales. El error medio absoluto (MAE), que establece qué tan lejos están las predicciones de los valores reales en promedio y no penaliza tanto los errores grandes como RMSE. El error medio de sesgo (MBE), que indica si las predicciones tienden a sobrestimar o subestimar los valores reales. Valores positivos significarán que el modelo tiende a subestimar y valores negativos que el modelo tiende a sobreestimar.

En lo concerniente del proceso del objetivo 2, para el cálculo de las absorciones de carbono atmosférico, GPP, aplicando el modelo de Monteith $GPP = \epsilon * fPAR * PAR$, se siguió el flujograma de la Figura 3.

Figura 3. Procesamiento de los datos ráster y climáticos para cálculo de la GPP anual.



Informe final de Proyecto de Investigación

1. Para la obtención de la PAR, se usaron los datos de EO de MCD18 V6.2, de las fechas coincidentes de la revisita del satélite en la zona de estudio, cada 5 días, generando 73 imágenes de PAR por cada año del 2016 al 2025, disponibles para su consulta en la nube de internet y sin necesidad de descarga.
2. Para la fAPAR, se generó el índice de vegetación EVI como producto directo, para cada una de las ± 73 imágenes de Sentinel-2 de cada año, usando las bandas espectrales del azul, rojo, e infrarrojo cercano.
3. Para la estimación del uso eficiente de luz (ϵ), se aplicó la formula:

$$\epsilon_g = \epsilon_0 \times \text{Tescalar} \times \text{Wescalar} \times \text{Pescalar}$$

Para la eficiencia máxima de luz el valor de ϵ_0 , se usó el valor estándar $1.84 \text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-2}$ (0.40 gC mol^{-1}). Este es un factor aplicado al cálculo de la GPP para cada una de las imágenes de cada año, del 2016 al 2025.

En relación con el Tescalar, se calculó a partir de valores de temperaturas mínimas, medias y máximas diarias coincidentes con las fechas de revisita del satélite Sentinel-2. Para esto, se consideraron las estaciones de La Candelaria, La máquina y Trinidad Magdalena. Los valores promedio de Tescalar, se utilizaron como un factor numérico para la estimación de la GPP en cada una de las ± 73 imágenes para cada uno de los 10 años.

Wescalar, este se calculó aplicando el índice de agua de superficial terrestre (LISW), usando las bandas del espectro electromagnético correspondientes al infrarrojo cercano y al infrarrojo de onda corta, además de extraer el máximo valor de LSWI, para cada pixel de cada una de las imágenes anuales.

En relación con el Pescalar, se utilizó el valor de 1, debido a que es un valor fenológico asociado a las hojas, refiriéndose a indicadores que miden diferentes aspectos del desarrollo y comportamiento de las hojas de las plantas a lo largo del tiempo. En este sentido, se asume que en los manglares se mantienen las copas de los árboles densas todo el año, o su índice de área de hoja siempre es densa.

Informe final de Proyecto de Investigación

4. Para la delimitación de la cobertura del mangle en el área de las Lisas – La Barrona, se utilizó el método de Random Forest, una modalidad de clasificación supervisada. Un proceso de entrenamiento en donde se identificó áreas con *Rhizophora* sp. *Avicenia germinans*, y *Laguncularia racemosa*, colocando 2092 puntos distribuidos en toda el área de cobertura de manglar, usando base interpretativa en color natural y falso color imágenes Sentinel-2.

Para correr el modelo de Random Forest, se utilizó un algoritmo creado en la plataforma de GEE, desarrollado por el Instituto Nacional de Bosques en el año 2025, modificado y adaptado para esta investigación, utilizando imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2.

Se hicieron 10 fechas, años 2016 a 2025, seleccionando una imagen entre finales de mayo e indicios de Julio, identificando imágenes Sentinel-2 sin nubes para el área de Las Lisas – La Barrona.

Al tener las imágenes de clasificación y la delimitación de las áreas de manglar, Se realizo una limpieza de pixeles, aplicando un filtro mayor sin afectar las clasificaciones de mangle, y conseguir la menor cantidad de pixeles que causen ruido.

5. Para procesar la GPP en cada fecha de revisita del satélite Sentinel-2, se desarrolló un algoritmo en GEE, que aplica los pasos establecidos en la Figura 3, para cada una de las ± 73 imágenes.

Para el cálculo de la GPP anual, siempre en el mismo código desarrollando en GEE, se aplicó el método por integración por trapecios entre cada una de las imágenes, y luego se realizó una sumatoria de cada una de las integraciones. Para esto se aplicó la siguiente ecuación:

$$A = GPP_i + GPP_{i+1} + 1/2 \cdot \Delta t$$

6. Sobre cada límite de manglar, diferente para cada uno de los 10 años, se proceso las estimaciones de GPP, todo en la plataforma en línea de GEE.
7. Finalmente, se realizó el análisis interanual del comportamiento de la GPP.

Informe final de Proyecto de Investigación

En relación con el objetivo 3, se realizó la intercomparación de los resultados de GPP derivados de productos de Sentinel-2 con los datos de las colecciones de GPP de MODIS. Para este fin, considerando que todo producto generado de forma indirecta —como es el caso de las estimaciones basadas en sensores satelitales— requiere validación con datos de campo, comúnmente obtenidos mediante torres de flujo Eddy Covariance utilizadas en países con mayor infraestructura tecnológica. Dada la limitada disponibilidad de este tipo de mediciones en la región de estudio, se emplearon como alternativa los datos históricos estandarizados de GPP de MODIS como referencia para una validación indirecta. Esta comparación se realizó con los resultados de GPP obtenidos en el objetivo 2, siguiendo de manera resumida los siguientes pasos metodológicos:

1. De los resultados de las series temporales de GPP producidas por Sentinel-2, se obtuvieron 10 imágenes de 10 metros de resolución que indican la absorción por cada píxel de $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$.
2. Se desarrollo un código de consulta y procesamiento en la plataforma de GEE para generar imágenes de GPP de los productos MODIS, de la colección MODIS/061/MOD17A2HGF.
3. Se generaron 10 imágenes de 500 m de resolución espacial, que es el producto de las colecciones antes mencionadas.
4. Se realizó un análisis de la variabilidad de las estimaciones de GPP mediante diagramas de cajas y bigotes (boxplots), con el objetivo de evaluar la dispersión, la mediana y el rango intercuartílico de los valores obtenidos para cada año y producto. Este análisis permitió comparar la distribución estadística de la GPP entre Sentinel-2 y MODIS.

Siguiendo el cálculo el mismo principio que en una regresión estadística, se aplicó un algoritmo para generar análisis con series temporales de datos, que consideran múltiples imágenes a la vez, observando valores de GPP, a partir de datos de radiación, producto del procesamiento de imágenes Sentinel-2 y la preestablecida por valores de las series temporales de datos estándar de las imágenes de MODIS vrs MCD18A1 versión 6.1.

Informe final de Proyecto de Investigación

8. Resultados

Al tener procesado cada valor de PAR diario de las cinco estaciones del 2018 al 2023, y algunos 2024, de piranómetro ubicados en Guatemala (GT) y en Mexico (MX), así como de los productos de EO, ERA-5, MCD18C20.061, MCD18C20.062 y GOES-R, correspondientes a la ubicación geográfica de los piranómetros, se realizaron los análisis estadísticos de R^2 , MBE, MAE Y RMSE, Tabla 10, y Figura 2

A cada valor diario de irradiación calculada de las tres estaciones con piranómetro en Guatemala, y los datos de EO de ERA-5 para cada lugar, se calcularon los estadísticos entre cada uno, siendo los promedios para R^2 de 0.48, MBE de 0.17, MAE $0.92 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}$ y RMS de $1.19 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}$.

Siempre en el territorio guatemalteco, las métricas entre los piranómetros localizados en el territorio guatemalteco y los productos de EO, en promedio, los coeficientes de determinación mostraron que MODIS V.6.2 presenta la mejor correlación con los datos observados (0.64), lo que indica el 64% de la variabilidad, seguido por MODIS V0.62 con 0.57. GOES tiene la menor capacidad explicativa (0.33), lo que sugiere baja fiabilidad estadística.

Para el MBE, ERA muestra el sesgo más equilibrado (0.17), indicando una ligera sobreestimación. MODIS V.6.2 y V.6.1 sobreestiman con valores relativamente altos con 0.61 y $0.53 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, respectivamente. GOES es el único que subestima ($\text{MBE} = -0.26 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$), lo que puede ser relevante según la aplicación.

Para el error absoluto medio, ERA tiene el valor más bajo con $0.92 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, lo que indica mayor precisión en promedio y MODIS V.6.2 tiene el MAE más alto ($1.14 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$), señalando mayores errores absolutos.

RMS (Raíz del error cuadrático medio), ERA tiene el menor RMS (1.19), lo que refleja una mejor gestión de errores grandes. MODIS_V62 y GOES comparten el peor valor (1.44), indicando mayor dispersión en los errores.

Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 10. Métricas estadísticas de irradiación diaria, entre piranómetro y productos de EO, años 2018 a 2023.

La Candelaria, GT	R	R ²	MBE MJ m ⁻²	MAE MJ m ⁻²	RMSE MJ m ⁻²
ERA 5	0.71	0.51	0.14	0.84	1.08
MODIS_V61	0.75	0.57	0.45	1.07	1.37
MODIS_V62	0.81	0.65	0.83	1.12	1.39
GOES	0.39	0.15	-0.50	1.14	1.62
La Máquina, GT					
ERA 5	0.63	0.40	0.33	0.97	1.25
MODIS_V61	0.75	0.56	0.67	1.11	1.41
MODIS_V62	0.79	0.62	0.94	1.18	1.47
GOES	0.80	0.65	0.23	0.69	0.90
Trinidad Magdalena, GT					
ERA	0.73	0.53	0.04	0.97	1.25
MODIS61	0.76	0.58	0.47	1.05	1.39
MODIS62	0.81	0.65	0.08	1.11	1.45
GOES	0.43	0.19	-0.51	1.32	1.81
Selegua, MX					
ERA 5	0.76	0.58	-0.32	1.02	1.34
MODIS_V61	0.94	0.88	-0.13	0.68	0.89
MODIS_V62	0.92	0.85	0.17	0.71	0.92
GOES	0.92	0.85	-0.65	0.89	1.16
UNAM, MX					
ERA 5	0.29	0.08	-0.16	1.88	2.44
MODIS_V61	0.86	0.73	-0.45	1.15	1.41
MODIS_V62	0.85	0.72	-0.50	1.16	1.45
GOES	0.86	0.74	-0.22	1.01	1.25

Debido a los resultados bajos de los coeficientes de determinación entre los productos de EO y los piranómetros de precisión moderada que se encuentran en Guatemala, se realizó una validación con estaciones de alta exactitud, estabilidad y consistencia, considerando los datos de piranómetros Kipp & Zoonen con los modelos SP21 y SP22, de las estaciones UNAM-Ciudad de Mexico y Selegua-Chiapas-Mexico, respectivamente, Tabla 10.

El análisis estadístico de irradiación entre los productos de OT y las dos estaciones en México, mostraron que en promedio el producto que obtuvo el mayor coeficiente de determinación fue MODIS

Informe final de Proyecto de Investigación

V1, con R^2 de 0.81, seguido GOES con un 0.80, MODIS V2 con 0.79, y ERA 5 con 0.33. Al comparar con los datos de productos validados como MCD18 (Wang Dongdong et al., 2020), los cuales obtuvieron valores de R^2 de 0.92 de radiación media. De forma similar los resultados MCD18 V6.2 (Li et al., 2025), evidenciaron un R^2 para la validación de la PAR de 0.89 y 0.92 para las versiones V6.1 y V6.2 de MODIS respectivamente.

A partir del análisis de la Tabla 10, se establece que, en promedio de las dos estaciones de México, la relación de la variabilidad de los datos R^2 observados para ERA 5 tuvo un pobre ajuste con un valor 0.33; MODIS V6.1 con 0.81, presento un ajuste muy bueno; MODIS V6.2 ligeramente menor con 0.79, y GOES, también muestra un ajuste muy bueno con 0.80.

En relación con el sesgo medio (MBE), en promedio para los dos sitios analizados, ERA 5 subestima levemente con $-0.24 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. MODIS V.6.1, subestima con -0.29 más que ERA 5, MODIS V6.2, tiene mejor sesgo y balance, subestimando con -0.17 , y GOES tiene la Mayor subestimación de todas, siendo $-0.44 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$.

En cuanto a el error cuadrático medio (RMSE), el cual penaliza los errores grandes, el mejor fue MODIS V.6.1 con un valor promedio de $1.15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, muy cercano MODIS V.6.2 con $1.18 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, siendo muy similar con GOES con $1.20 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, y por último ERA 5 con un 1.89.

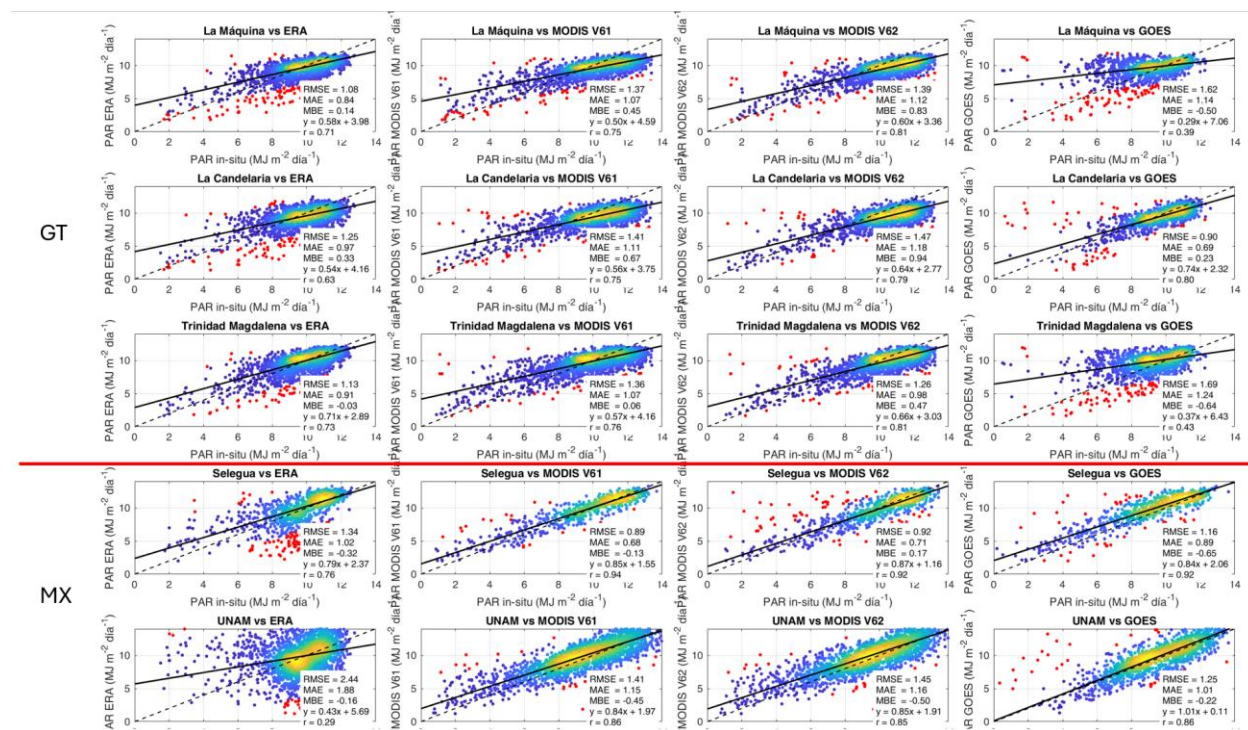
Por su parte al analizar el promedio de los errores absolutos (MAE), considerando en cuanto más bajo el valor mejor, en su media para revalidación en México, en orden prioritario sería: MODIS V.6.1 con $0.91 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, cercano MODIS V.6.2 con $0.93 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, GOES $0.95 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ y ERA 5 el más alto con $1.45 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$.

La Figura 4 muestra la comparación entre la radiación fotosintéticamente activa (PAR) estimada a partir de diferentes productos satelitales y de reanálisis (ERA, MODIS V61, MODIS V62 y GOES) frente a mediciones in situ en los cinco sitios de estudio localizados en Guatemala y México. En general, los resultados muestran una relación positiva entre las estimaciones satelitales y las mediciones de campo, aunque con diferentes niveles de precisión dependiendo del producto y del sitio.

Informe final de Proyecto de Investigación

En los sitios ubicados en Guatemala, los coeficientes de determinación (R^2) variaron aproximadamente entre 0.58 y 0.76, indicando una capacidad moderada a alta de los productos satelitales para reproducir la variabilidad de la PAR observada. En La Máquina, los productos MODIS presentaron un mejor ajuste con los datos in situ, alcanzando valores de R^2 cercanos a 0.61, mientras que ERA mostró un desempeño ligeramente inferior ($R^2 \approx 0.58$). El error cuadrático medio (RMSE) para este sitio osciló entre 1.08 y 1.62 $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, dependiendo del producto utilizado.

Figura 4. Comparación entre datos PAR de piranómetros de baja sensibilidad y rango de medición en Guatemala (GT), y de alta sensibilidad y rango en México (MX) y PAR de productos de EO.



Los resultados de la GPP por cada año, aplicando el modelo de Monteith, usando los datos satelitales de Sentinel-2 de las colecciones disponibles, siendo COPENICUS/S2_HARMONIZED del 2016 al 2018 y COPENICUS/S2_SR_HARMONIZED del 2019 al 2025, así como los productos de PAR de MCD18-V6.2 y factores de temperatura, fueron obtenidos como se explica el proceso de la Figura 3.

Informe final de Proyecto de Investigación

La estimación espacialmente explícita de la GPP, para el ecosistema de manglar de Las Lisas – La Barrona, reveló una variabilidad interanual significativa durante el periodo 2016–2025, Figura 5, así como su espacialización, Figura 6. Los valores medios anuales de GPP oscilaron entre 1688 y 2903 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$, con un promedio general de 2275 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$, lo cual se encuentra dentro del rango esperado reportado para ecosistemas de manglar tropical (Sri Rahayu Romadhoni et al., 2022).

Los valores más altos de productividad se observaron en 2017 con un promedio 2903 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ y para el 2016, 2637 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$, mientras que el valor más bajo ocurrió en 2024, siendo de 1688 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$. Valores intermedios y relativamente estables se registraron entre 2020 y 2023, con un rango de 2238 a 2352 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$, Figura 5.

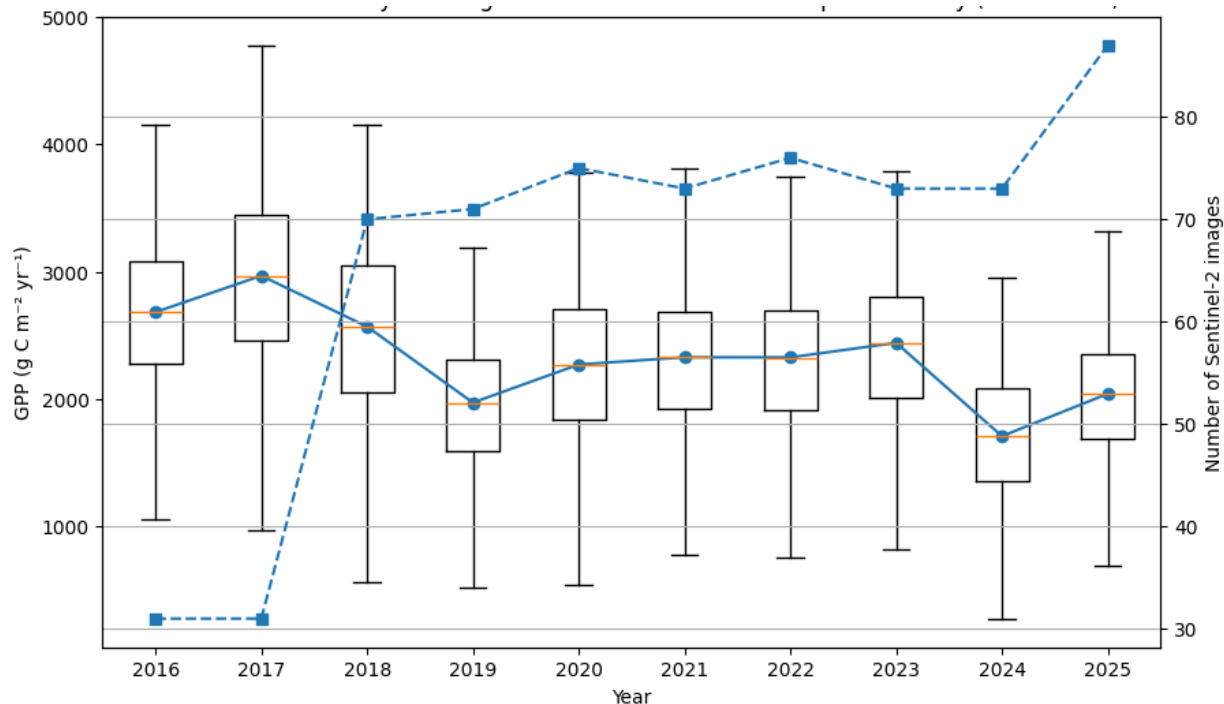
Al convertir estos valores a productividad por unidad de área, la fijación anual de carbono del manglar osciló entre 16.9 y 29.0 $\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$, con un promedio equivalente a 22.75 $\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$.

La influencia de la densidad temporal de escenas de Sentinel-2 en las estimaciones de GPP depende de la disponibilidad por año, según el tipo de producto. COPERNICUS/S2_HARMONIZED para el área de Las Lisas - La Barrona cuenta con 31 escenas para el 2016 y 2017, en comparación a 70 a 87 escenas anuales después de 2018, correspondientes a las colecciones de COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED. Este cambio en la densidad temporal del muestreo influyó de manera importante en la estabilidad de las estimaciones anuales de GPP.

Los años con menor número de observaciones, 2016 y 2017, presentaron valores de GPP más altos, lo cual probablemente refleja efectos de interpolación temporal durante el proceso de integración anual. Por el contrario, cuando el número de observaciones superó aproximadamente 70 escenas por año, las estimaciones de GPP convergieron hacia valores más estables, aproximadamente 2200–2350 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$. Esta estabilización sugiere que una alta densidad temporal de imágenes Sentinel-2 es fundamental para capturar con precisión la dinámica estacional de la fotosíntesis en ecosistemas de manglar.

Informe final de Proyecto de Investigación

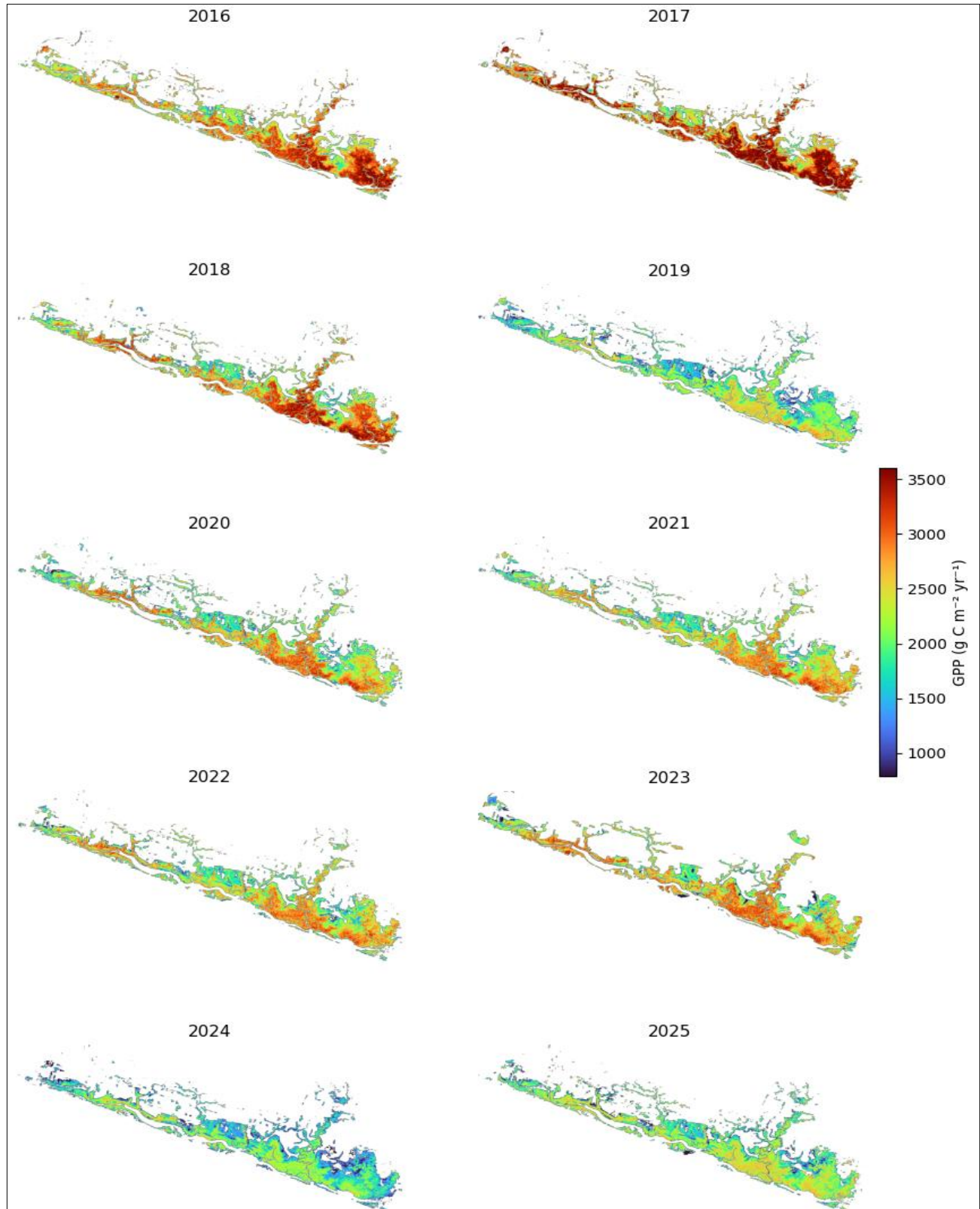
Figura 5. Variabilidad interanual de la GPP, y No. imágenes Sentinel-2 para la estimación



La distribución espacial de la GPP se mantuvo notablemente consistente a lo largo del periodo de estudio, Figura 6. Las áreas de mayor productividad se localizaron principalmente en donde convergen especies asociadas al género *Rhizophora*, mientras que valores relativamente más bajos se observaron hacia otra especie como lo es *Avicenia germinans*, en base a la convergencia de las coberturas de manglar y los resultados de la GPP.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 6. Distribución espacial anual GPP (2016-2025), Las Lisas – La Barrona.

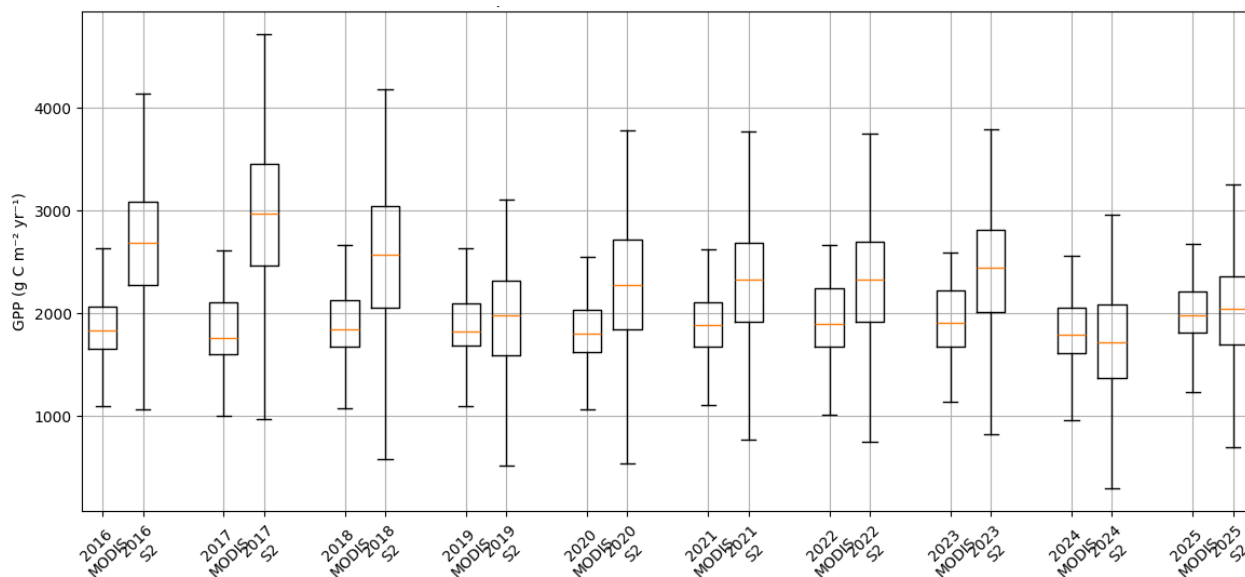


Informe final de Proyecto de Investigación

Debido a la ausencia de mediciones directas de intercambio de carbono mediante torres de flujo Eddy Covariance, la evaluación del modelo de productividad se realizó mediante validación indirecta, comparando las estimaciones de GPP obtenidas con Sentinel-2 con el producto global de productividad MODIS GPP (MOD17). Figura 7.

El producto MODIS proporciona estimaciones globales de productividad primaria basadas en el modelo de eficiencia en el uso de la luz (LUE), ampliamente utilizado para estudios de productividad terrestre. La comparación entre las estimaciones de productividad primaria bruta derivadas de Sentinel-2 y MODIS muestra una concordancia general en el rango de valores estimados para el ecosistema de manglar, siendo los valores medios obtenidos aproximadamente $2275 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ y $1981 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$, respectivamente.

Figura 7. Comparación anual de la distribución de la GPP (MODIS vs Sentinel-2)



Informe final de Proyecto de Investigación

9. Discusión de Resultados

En relación los sitios en Guatemala al validar los productos, en la estación La Candelaria se observaron valores de R^2 entre 0.63 y 0.74, con errores RMSE entre 0.90 y 1.47 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$. En este caso, el producto GOES mostró uno de los mejores desempeños, con un RMSE cercano a 0.90 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ y un coeficiente de determinación de aproximadamente 0.74.

Para el sitio Trinidad Magdalena, las correlaciones fueron relativamente altas, particularmente para los productos MODIS, con valores de R^2 cercanos a 0.76–0.81 y errores RMSE entre 1.26 y 1.69 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$. La pendiente de las regresiones en estos casos fue cercana a la unidad, indicando una buena correspondencia entre las estimaciones satelitales y las observaciones in situ.

En los sitios ubicados en México se observaron diferencias importantes entre productos. En Selegua, los coeficientes de determinación variaron entre 0.76 y 0.92, con RMSE entre 0.89 y 1.34 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$, destacando nuevamente el buen desempeño de los productos MODIS. En el caso de UNAM, los productos satelitales mostraron correlaciones elevadas, particularmente MODIS V61 y MODIS V62, con valores de R^2 cercanos a 0.85 y errores RMSE alrededor de 1.14–1.45 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$. Por el contrario, el producto ERA presentó un desempeño considerablemente menor en este sitio, con un coeficiente de determinación de aproximadamente 0.18 y un RMSE cercano a 2.44 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$.

En general, los valores del error absoluto medio (MAE) se mantuvieron entre 0.69 y 1.24 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$, mientras que el error medio sesgado (MBE) mostró valores relativamente bajos, indicando un sesgo reducido en la mayoría de los productos evaluados. Sin embargo, en varios casos se observó una ligera subestimación de los valores altos de PAR, particularmente en condiciones de alta radiación.

En complemento, considerando las características instrumentales, Tabla 3, las diferencias observadas entre los estadísticos de ajuste (RMSE, MAE, MBE y R^2) entre los sitios de Guatemala (La Máquina, Trinidad Magdalena y La Candelaria) y México (Selegua y UNAM) están asociadas al tipo de sensor utilizado para medir la radiación en cada estación.

Informe final de Proyecto de Investigación

En Guatemala se utilizaron principalmente sensores SP-Lite2 y Ventage Pro2 DS6450, mientras que en México se emplearon sensores CPM22 y CPM21, los cuales presentan especificaciones instrumentales diferentes.

En particular, los sensores utilizados en México presentan errores instrumentales significativamente menores (± 0.2 %) en comparación con los sensores utilizados en Guatemala (± 2 %). Esta mayor precisión instrumental contribuye a explicar los mayores coeficientes de determinación observados en los sitios mexicanos, especialmente en la estación UNAM, donde los productos MODIS mostraron valores de R^2 cercanos a 0.85.

Además, el rango espectral de los sensores de los piranómetros puede influir en la comparación con estimaciones de PAR derivadas de satélite. Los sensores SP-Lite2 utilizados en Guatemala operan principalmente entre el rango de 400 a 1100 nm, mientras que los sensores CPM utilizados en México abarcan un rango espectral más amplio que se extiende hasta el infrarrojo medio, hasta 2800 nm. Esta diferencia puede generar variaciones en la fracción de radiación registrada por cada sensor, particularmente bajo condiciones atmosféricas variables o presencia de aerosoles.

Otro factor relevante es la sensibilidad del sensor, que determina la capacidad del instrumento para detectar pequeñas variaciones en la radiación incidente. Los sensores SP-Lite2 presentan sensibilidades mayores ($60\text{--}100 \mu\text{V W}^{-1} \text{ m}^2$), mientras que los sensores CPM presentan sensibilidades menores pero con mayor precisión instrumental y estabilidad de medición.

En consecuencia, parte de la variabilidad observada en los errores (RMSE y MAE) entre estaciones esta asociada a diferencias en la instrumentación y calibración de los sensores, además de posibles factores ambientales como nubosidad, topografía o variabilidad atmosférica.

En conjunto, estos resultados sugieren que las comparaciones entre productos satelitales de EO y mediciones in situ deben considerar cuidadosamente las características técnicas de los sensores utilizados como referencia, ya que las diferencias instrumentales pueden introducir incertidumbres adicionales en la validación del desempeño de los productos de radiación.

Informe final de Proyecto de Investigación

Estas diferencias instrumentales pueden influir en la comparación con los productos satelitales, especialmente cuando se analizan estimaciones derivadas de modelos radiativos que consideran diferentes rangos espectrales.

La productividad del manglar en el contexto global para los manglares de Las Lisas - La Barrona, se encuentran dentro del rango comúnmente reportado para ecosistemas de manglar tropical.

Estudios previos indican que la productividad primaria bruta de los manglares generalmente varía entre 500 a 4600 g C m⁻² año⁻¹, dependiendo de las condiciones ambientales y de la estructura del bosque. (Sri Rahayu Romadhoni et al., 2022).

La productividad media estimada en este estudio es de 2275 g C m⁻² año⁻¹ es consistente con mediciones obtenidas tanto por observaciones de campo como por modelos satelitales de bosques tropicales costeros. Estos valores se encuentran cercanos de las tasas reportadas mundiales de aproximadamente a 1971 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, (Alongi, 2014), lo que resalta el papel de los manglares como ecosistemas costeros altamente productivos y como contribuyentes importantes al ciclo del carbono en ambientes costeros.

El análisis de la serie temporal revela tres fases principales en la dinámica de la productividad del manglar. Los primeros años del periodo (2016–2017) presentaron valores elevados de productividad, asociados a la limitada cobertura temporal de imágenes Sentinel-2, estando únicamente disponibles 31 escenas para cada año. A partir de 2018, cuando el número de imágenes disponibles aumentó significativamente, las estimaciones anuales de GPP se estabilizaron dentro de un rango más estrecho.

En complemento a lo anterior, Las diferencias en los niveles de procesamiento radiométrico pueden influir significativamente en los IV y las estimaciones derivadas de la productividad del ecosistema obtenidas a partir de datos satelitales ópticos. En el caso de Sentinel-2, los productos de Nivel 1C proporcionan reflectancia en la parte superior de la atmósfera (TOA), siendo el caso de COPERNICUS/S2_HARMONIZED las utilizadas para los años 2016 al 2018. Mientras que los

Informe final de Proyecto de Investigación

productos de Nivel 2A COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED, proporcionan reflectancia superficial (SR) después de la corrección atmosférica utilizando el procesador Sen2Cor desarrollado por la Agencia Espacial Europea. Los efectos atmosféricos como la dispersión molecular, los aerosoles y la absorción de vapor de agua pueden modificar los valores de reflectancia en las regiones espectrales roja e infrarroja cercana, lo que genera sesgos en los índices de vegetación comúnmente utilizados, como en los índices EVI y NDVI. Varios estudios que utilizan Sentinel-2 han informado que el NDVI derivado de la reflectancia TOA puede diferir del NDVI basado en la reflectancia superficial en aproximadamente un 5-25 %, dependiendo de las condiciones atmosféricas, la estructura de la vegetación y la geometría de la iluminación, (Gascon et al., 2017) y (Claverie et al., 2018). Dado que los índices de vegetación se utilizan a menudo como insumos en modelos de eficiencia lumínica o biofísicos de la fotosíntesis, estas discrepancias pueden propagarse a través de las formulaciones de los modelos y generar diferencias amplificadas en las estimaciones de productividad del ecosistema. En consecuencia, la GPP derivada de la reflectancia del TOA puede sobreestimarse en aproximadamente un 10-40 % en comparación con las estimaciones basadas en la reflectancia superficial, especialmente en condiciones de alta carga de aerosoles o profundidad óptica atmosférica variable.

Entre 2020 y 2023, los valores de productividad permanecieron relativamente constantes, lo que sugiere que el ecosistema mantuvo un desempeño fotosintético estable durante este periodo. Sin embargo, se observó una disminución marcada de la productividad en 2024, correspondiente al valor de GPP más bajo de toda la serie temporal. Este tipo de reducciones en la productividad del manglar puede estar asociado a factores de estrés ambiental, incluyendo variaciones en temperatura, precipitación, salinidad o eventos climáticos extremos que afectan los ecosistemas costeros. El incremento observado en 2025 sugiere una recuperación parcial de la actividad fotosintética, aunque los niveles de productividad permanecieron ligeramente por debajo del promedio de largo plazo.

En relación con la comparación entre los productos, el análisis estadístico indica que las estimaciones derivadas de Sentinel-2 presentan un sesgo positivo moderado respecto a MODIS MOD17A2HGF de $+294 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$, equivalente aproximadamente al 15 %. Esta disimilitud es debido principalmente a la diferencia en resolución espacial entre sensores, 10 y 500 m. Además, los píxeles MODIS integran

Informe final de Proyecto de Investigación

múltiples coberturas dentro de un mismo píxel (manglar, agua, pastos, salineras, áreas urbanas, entre otras), lo que produce una suavización de la productividad estimada. En contraste, Sentinel-2 captura mejor la heterogeneidad del dosel del manglar por su mayor resolución espacial.

La comparación de las series temporales revela comportamientos diferentes entre sensores. La Serie Sentinel-2 presenta mayor variabilidad interanual, $1688 - 2903 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$, lo que podría indicar mayor sensibilidad para detectar anomalías climáticas, cambios en actividad fotosintética y heterogeneidad espacial. La serie MODIS muestra una serie más estable, $1910 - 2084 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$, debido a resolución espacial más gruesa y por consiguiente mayor suavización temporal del producto.

La Comparación de las distribuciones espaciales de los boxplots anuales, Figura 7, muestran que Sentinel-2 presenta mayor rango intercuartílico, mayor dispersión espacial. Esto por una mejor captura en la delimitación de los manglares, traducida en una mejor variabilidad estructural del manglar por diferencias entre zonas costeras e interiores. MODIS, en cambio produce distribuciones más compactas debido a su resolución espacial más baja.

Informe final de Proyecto de Investigación

10. Beneficiarios directos e indirectos

Tabla 11. Beneficiarios directos e indirectos de la investigación

Resultados o productos potenciales	Beneficiarios directos	Número de beneficiarios directos	Beneficiarios indirectos	Número de beneficiarios indirectos
Tasas de carbono absorbido por los bosques de manglar durante 9 años	Comunidades y poblaciones humanas, crustáceos, peces, bivalvos, aves, flora	1 ecosistema, Las Lisas – La Barrona	Población de 3154 personas asociados de las comunidades del ecosistema de manglar	Población guatemalteca, por mitigar los gases de efecto de invernadero
Cuantificación de la GPP	Instituciones que velan por el manejo sostenible de los ecosistemas (CONAP, INAB, CEMA, CECON, ONGs)	Al menos 5 instituciones con injerencia en la gestión del ecosistema	Instituciones y directivos como tomadores de decisiones para dirigir recursos en el manejo ecosistémico del área	Mas de 20 comunidades dentro y fuera del ecosistema Las Lisas – La Barrona.
Metodología de cuantificación de la GPP para que sea replicada en otros ecosistemas de manglar en Guatemala	Litorales del pacifico y atlántico guatemalteco	7 departamentos que tienen colindancia con los litorales guatemaltecos y las instituciones que velan por la gestión de los ecosistemas de manglar	Instituciones y directivos como tomadores de decisiones para dirigir recursos en el manejo ecosistémico del área	Población guatemalteca, por mitigar los gases de efecto de invernadero

11. Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.

La socialización de los resultados del proyecto de investigación se ha realizado por medio de las redes sociales de la Universidad de San Carlos de Guatemala, especialmente las vinculados a la DIGI y el Instituto de Investigaciones Hidrobiológicas (IIH) del CEMA en sus cuentas de Facebook, Instagram y TikTok y otros medios que se consideren apropiados. Así mismo, se realizará la publicación científica en indizada. Por su parte, la información contenida en el informe final se divulgo con los actores principales de las Aldeas de Las Lisas y La Barrona, como es el caso de entidades gubernamentales y COCODES que inciden en la gestión y conservación del ecosistema de manglar.

Informe final de Proyecto de Investigación

Se realizó la presentación de los resultados preliminares en el 3er Simposio de Manglares, Retalhuleu julio del 2025, y otros propiciados por la DIGI y el IIH.

	Sí	No
Presentación TV		X
Entrevistas radiales		X
Podcast		X
Entrevista DIGI	X	
Recursos audiovisuales	X	
Congresos científicos nacionales o internacionales	X	
Talleres	X	
Publicación de libro		X
Publicación de capítulo en un libro x		X
Publicación de artículo científico	X	
Divulgación por redes sociales institucionales	X	
Conversatorios con especialistas		X
Presentación pública		X
Presentación autoridades USAC	X	
Presentación a beneficiarios directos	X	
Entrega de resultados	X	
Docencia en grado	X	
Docencia postgrado	X	
Póster científico	X	
Trifoliales		X
Conferencias	X	
Encuentros de campo (días de campo)		X
Intercambio de conocimientos y experiencias con productores y vendedores...		X
Otro (describa)		

12. Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND)

Los resultados de la investigación aportarán a las metas de las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND), en la gestión y valoración económica de los Recursos Naturales, así como en la disponibilidad y acceso al agua, siendo las siguientes:

- Meta 14.2 gestionar y proteger de manera sostenible los ecosistemas marinos y costeros con miras a evitar efectos nocivos importantes, incluso mediante el fortalecimiento de su resiliencia, y adoptar medidas para su restablecimiento al objeto de mantener océanos sanos y productivos.
- Meta 14.a.1 porcentaje del presupuesto total de investigación asignada a la investigación en el campo de la tecnología marina.

Informe final de Proyecto de Investigación

- Meta 14.2.1 número de países que aplican enfoques basados en los ecosistemas para gestionar las zonas marinas.
- Meta 14.5 conservar por lo menos el 10% de las zonas costeras y marinas, de conformidad con las leyes nacionales y el derecho internacional y sobre la base de la mejor información científica disponible.
- Meta 14.5.1 Áreas clave de zona marina dentro del Sistema Guatemalteco de Áreas Protegidas (SIGAP).

13. Vinculación

El proyecto de investigación tuvo vinculación con el sector gubernamental por medio del Instituto Nacional de Bosques, esto para que se usen los algoritmos de estimaciones de GPP y se apliquen a otros ecosistemas de manglar en Guatemala. Además, siendo este el ente rector del recurso forestal en Guatemala y que a la vez tiene representación como promotor de algunas estrategias de incentivos forestales que ya se ejecutan en el área de las Las Lisas y La Barrona y que tienen relevancia en temas de absorciones y reservas de Carbono.

Informe final de Proyecto de Investigación

14. Conclusiones

Los resultados indican que los productos basados en MODIS, particularmente MCD18 versión 6.1 y 6.2, presentan el mejor desempeño global para la estimación de PAR diaria en los sitios analizados, mostrando una mayor capacidad para reproducir la variabilidad observada en comparación con ERA5 y GOES.

El análisis comparativo entre las estimaciones de radiación fotosintéticamente activa (PAR) derivadas de productos de Observación de la Tierra y las mediciones in situ de piranómetros permitió evaluar el desempeño de diferentes fuentes de datos para la estimación de PAR diaria en sitios de Guatemala y México durante el periodo 2018–2023 (y parcialmente 2024). Los resultados evidencian que el desempeño de los productos satelitales y de reanálisis varía en función tanto del producto utilizado como de la calidad instrumental de las estaciones de referencia.

Para el caso de las validaciones en Mexico, se observaron coeficientes de determinación considerablemente mayores, con valores promedio de $R^2 = 0.81$ para MODIS V6.1, $R^2 = 0.80$ para GOES y $R^2 = 0.79$ para MODIS V6.2, mientras que ERA5 presentó un ajuste significativamente menor ($R^2 = 0.33$). En términos de errores, los productos MODIS mostraron los mejores resultados, con RMSE promedio cercanos a $1.15\text{--}1.18 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ y MAE de aproximadamente $0.91\text{--}0.93 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$, seguidos por GOES y, finalmente, ERA5 con los mayores errores.

La estimación de la productividad primaria bruta (GPP) del ecosistema de manglar de Las Lisas–La Barrona mediante el modelo de eficiencia en el uso de la luz de Monteith, integrando imágenes satelitales de Sentinel-2 y datos de PAR derivados de MODIS (MCD18 V6.2), permitió caracterizar la dinámica espaciotemporal de la productividad durante el periodo 2016–2025. Los resultados evidenciaron una variabilidad interanual considerable, con valores medios anuales de GPP entre 1688 y $2903 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ y un promedio general de $2275 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$. De acuerdo con los resultados obtenidos, el ecosistema de manglar de Las Lisas es capaz de fijar aproximadamente $22\text{--}23 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ mediante procesos fotosintéticos lo cual se encuentra dentro del rango reportado para ecosistemas de manglar tropical.

El análisis también evidenció que la densidad temporal de imágenes de Sentinel-2 influye significativamente en la estabilidad de las estimaciones de GPP. Los años con menor número de

Informe final de Proyecto de Investigación

escenas disponibles mostraron valores de productividad más elevados, probablemente asociados a efectos de interpolación temporal.

La comparación entre las estimaciones de GPP derivadas de Sentinel-2 y MODIS muestra una buena consistencia general tanto en magnitud como en patrones espaciales de productividad. Aunque Sentinel-2 tiende a producir valores superiores debido a su mayor resolución espacial, ambas series se encuentran dentro del rango esperado para manglares tropicales. La concordancia observada respalda la confiabilidad del modelo aplicado y demuestra el potencial de las imágenes Sentinel-2 para monitorear la productividad y dinámica del carbono en ecosistemas de manglar a escalas espaciales finas.

15. Recomendaciones

Futuras investigaciones deberían evaluar la integración de múltiples productos de observación de la Tierra mediante enfoques de fusión de datos o calibración regional, lo cual podría mejorar la estimación de PAR y su aplicación en modelos de productividad primaria, especialmente en ecosistemas tropicales y costeros donde las condiciones atmosféricas son altamente variables.

Se sugiere fortalecer las redes de monitoreo radiométrico en Guatemala mediante la instalación de piranómetros de mayor precisión y estabilidad instrumental, lo que permitiría mejorar los procesos de validación y reducir la incertidumbre en la comparación con productos satelitales.

El país debería de invertir en capacidades y adquisición de tecnologías para incorporar mediciones directas de intercambio de carbono mediante torres de flujo Eddy Covariance, lo que permitiría validar de manera más robusta los modelos de productividad derivados de sensores remotos.

Se sugiere realizar futuras investigaciones considerando variables ambientales adicionales, como precipitación, salinidad, temperatura del aire y del agua, así como eventos climáticos extremos, con el

Informe final de Proyecto de Investigación

fin de comprender con mayor precisión los factores que controlan la variabilidad interanual de la productividad del manglar.

Se recomienda utilizar preferentemente productos de reflectancia superficial (Nivel 2A) de Sentinel-2 para la estimación de índices de vegetación y productividad, ya que la corrección atmosférica reduce los sesgos asociados a la reflectancia en la parte superior de la atmósfera. Además, Para mejorar la precisión de las estimaciones de GPP, es recomendable mantener una alta densidad temporal de imágenes satelitales, asegurando un número suficiente de observaciones a lo largo del año que permitan capturar adecuadamente la variabilidad estacional de la fotosíntesis.

Finalmente, se recomienda ampliar el análisis a escalas espaciales mayores dentro del litoral del Pacífico y atlántico guatemalteco, lo que permitiría evaluar el papel regional de los manglares en la captura de carbono y fortalecer su inclusión en estrategias de conservación y mitigación del cambio climático.

Informe final de Proyecto de Investigación

16. Referencias

- Aceituno, M., Cifuentes, C., Cojon, J., & Bosarreyes, A. (2016). *Estimación del contenido de carbono en el componente arbóreo del ecosistema manglar en el pacífico de Guatemala*.
- Agency, E. S. (2024). *Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A Surface Reflectance Harmonized (COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED) [Data set]*. Google Earth Engine. <https://developers.google.com/earth->
- Alongi, D. M. (2014). Carbon Cycling and Storage in Mangrove Forests. *Annual Review of Marine Science*, 6(1), 195–219. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135020>
- As-syakur, A. R., Osawa, T., & Adnyana, I. W. S. (2010). Medium Spatial Resolution Satellite Imagery to Estimate Gross Primary Production in an Urban Area. *Remote Sensing*, 2(6), 1496–1507. <https://doi.org/10.3390/rs2061496>
- Baseline Surface Radiation Network. (2025). *World Radiation Monitoring Center*. <https://bsrn.awi.de/>
- Casanova, D., Epema, G. F., & Goudriaan, J. (1998). Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI. *Field Crops Research*, 55(1–2), 83–92. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00064-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00064-6)
- Claverie, M., Ju, J., Masek, J. G., Dungan, J. L., Vermote, E. F., Roger, J.-C., Skakun, S. V., & Justice, C. (2018). The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set. *Remote Sensing of Environment*, 219, 145–161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.002>
- Carrer, D., Roujean, J., Lafont, S., Calvet, J., Boone, A., Decharme, B., Delire, C., & Gastellu-Etchegorry, J. (2013). A canopy radiative transfer scheme with explicit FAPAR for the interactive vegetation model ISBA-A-gs: Impact on carbon fluxes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118(2), 888–903. <https://doi.org/10.1002/jgrg.20070>
- Chen, J. M., & Cihlar, J. (1996). Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. *Remote Sensing of Environment*, 55(2), 153–162. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00195-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00195-6)
- Chen, J. M., Rich, P. M., Gower, S. T., Norman, J. M., & Plummer, S. (1997). Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 102(24), 29429–29443. <https://doi.org/10.1029/97jd01107>
- Connolly, J., Roulet, N. T., Seaquist, J. W., Holden, N. M., Lafleur, P. M., Humphreys, E. R., Heumann, B. W., & Ward, S. M. (2009). Using MODIS derived <i>fPAR</i> with ground based flux tower measurements to derive the light use efficiency for two Canadian peatlands. *Biogeosciences*, 6(2), 225–234. <https://doi.org/10.5194/bg-6-225-2009>
- Climate Data Store. (2024). *ERA5-Land hourly data from 1950 to present*. <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land?tab=overview>
- Dávila, C., García, M., & Velásquez, P. (2019). Aporte al conocimiento de la conectividad del manglar de Las Lisas-La Barrona, Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 103. <https://doi.org/https://doi.org/10.36829/63CTS.v6i2.667>
- Dawson, T. P., North, P. R. J., Plummer, S. E., & Curran, P. J. (2003). Forest ecosystem chlorophyll content: Implications for remotely sensed estimates of net primary productivity. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 611–617. <https://doi.org/10.1080/01431160304984>

Informe final de Proyecto de Investigación

- Duchemin, B., Hadria, R., Erraki, S., Boulet, G., Maisongrande, P., Chehbouni, A., Escadafal, R., Ezzahar, J., Hoedjes, J. C. B., Kharrou, M. H., Khabba, S., Mougenot, B., Olioso, A., Rodriguez, J.-C., & Simonneaux, V. (2006). Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*, 79(1), 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.02.013>
- Fassnacht, K. S., Gower, S. T., Norman, J. M., & Mcmurtric, R. E. (1994). A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 71, 183–207. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)90107-4](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)90107-4)
- Gascon, F., Bouzinac, C., Thépaut, O., Jung, M., Francesconi, B., Louis, J., Lonjou, V., Lafrance, B., Massera, S., Gaudel-Vacaresse, A., Languille, F., Alhammoud, B., Viallefont, F., Pflug, B., Bieniarz, J., Clerc, S., Pessiot, L., Trémas, T., Cadau, E., ... Fernandez, V. (2017). Copernicus Sentinel-2A Calibration and Products Validation Status. *Remote Sensing*, 9(6), 584. <https://doi.org/10.3390/rs9060584>
- García, P., Franco, I., & Paiz, D. (2022). *Estimación de carbono azul del componente suelo en el ecosistema de manglar Las Lisas-La Barrona en el Pacífico de Guatemala*.
- Gholz, H. L., Grier, C. C., Campbel, A. G., & Brown, A. T. (1979). *Leaf area of plants in the pacific northwest*. https://ir.library.oregonstate.edu/concern/technical_reports/bn999796n?locale=en
- Global Climate Observing System (GCOS). (2011). *Systematic Observation Requirements for Satellite-Based Data Products for Climate 2011 Update*. https://ceos.org/document_management/Working_Groups/WGClimate/Documents/gcos-154.pdf
- GOES-R, A. W. G. and G.-R. P. (2017). NOAA GOES-R Series Advanced Baseline Imager (ABI) Level 2 Downward Shortwave Radiation: Surface. <https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C01524>
- Google. (2024). *Google Colab*. <https://colab.research.google.com/>
- Instituto de Cambio Climático. (2024). *Meteorología*. <https://icc.org.gt/es/estaciones/>
- Gower, S. T., & Norman, J. M. (1991). Rapid Estimation of Leaf Area Index in Conifer and Broad-Leaf Plantations. *Source: Ecology*, 72(5), 1896–1900. <https://doi.org/10.2307/1940988>
- Grier, C. G., & Running, S. W. (1977). Leaf Area of Mature Northwestern Coniferous Forests: Relation to Site Water Balance. *Ecology*, 58(4), 893–899. <https://doi.org/10.2307/1936225>
- HIRANO, T., SEGAI, H., HARADA, T., LIMIN, S., JUNE, T., HIRATA, R., & OSAKI, M. (2007). Carbon dioxide balance of a tropical peat swamp forest in Kalimantan, Indonesia. *Global Change Biology*, 13(2), 412–425. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01301.x>
- Instituto de Cambio Climático. (2024). *Meteorología*. <https://icc.org.gt/es/estaciones/>
- Instituto Nacional de Bosques. (2024). *Monitoreo de Carbono Aéreo y Subterráneo en el Ecosistema Manglar*. <https://sig.inab.gob.gt/portal/apps/dashboards/2005d5f10e81459fa9e62c2bf835de17>
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press.
- ISO 9060, I. S. I. (2018). *Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation*. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:9060:ed-2:v1:en>
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., & Baret, F. (2004). Methods for Leaf Area Index Determination Part I: Theories, Techniques and Instruments. *Agricultural for Meteorology*, 121, 19–35.

Informe final de Proyecto de Investigación

- Kipp & Zonen. (2013). *SP Lite2 Silicon Pyranometer*. June, 2.
<http://www.kippzonen.com/Download/358/Brochure-Pyranometers-SP-Lite2-English>
- Kipp & Zonen CMP. (2018). *Premium pyranometers for highest requirements*.
<https://www.kippzonen.com/Product/15/CMP22-Pyranometer>
- Liang, S. (2004). *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. Wiley.
<https://doi.org/10.1002/047172372X>
- Liang, S., Zheng, T., Liu, R., Fang, H., Tsay, S., & Running, S. (2006). Estimation of incident photosynthetically active radiation from Moderate Resolution Imaging Spectrometer data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D15). <https://doi.org/10.1029/2005JD006730>
- Liang, Shunlin., & Wang, Jindi. (2020). *Advanced remote sensing Terrestrial information extraction and applications*. Elsevier.
- Li, R., Wang, D., Devadiga, S., Sarkar, S., & Roman, M. O. (2025). MCD18 V6.2: A New Version of MODIS Downward Shortwave Radiation and Photosynthetically Active Radiation Products. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 22, 1–5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2024.3507822>
- Manzo, D., Franco, I., & Paiz, G. (2024). *Acumulación multitemporal de carbono azul en el dosel del bosque de manglar, Las Lisas-La Barrona en el Pacífico de Guatemala*.
- Monteith, J. L. (1972). Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *The Journal of Applied Ecology*, 9(3), 747. <https://doi.org/10.2307/2401901>
- Muñoz, S. J. (2019). *ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (<date of access>).
<https://doi.org/doi:10.24381/cds.68d2bb30>
- Myneni, R. B., Nemani, R. R., & Running, S. W. (1997). Estimation of Global Leaf Area Index and Absorbed Par Using Radiative Transfer Models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(6), 1380–1393. <https://doi.org/10.1109/36.649788>
- NOAA. (2019). GOES-R Series Product Definition and Users' Guide (PUG). Volume 5: Level 2+ Products. In *Noaa* (Vol. 5, pp. 1–689). <https://www.goes-r.gov/products/docs/PUG-L2+-vol5.pdf>
- ONSET. (2015). *Silicon Pyranometer Smart Sensor (S-LIB-M003) Manual* (p. 3). chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcgclclefindmkaj/https://www.instrumart.com/assets/HOBO-S-LIB-Datasheet.pdf?srsId=AfmBOooKu-QjiCCi8RkEBAwbv3pchX3c35PSbosToQH3N26d4wA_tlCK
- Potter, C. S., Randerson, J. T., Field, C. B., Matson, P. A., Vitousek, P. M., Mooney, H. A., & Klooster, S. A. (1993). Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 7(4), 811–841. <https://doi.org/10.1029/93GB02725>
- Prince, S. D., & Goward, S. N. (1995). Global Primary Production: A Remote Sensing Approach. *Journal of Biogeography*, 22(4/5), 815. <https://doi.org/10.2307/2845983>
- Reichstein, M., Falge, E., Baldocchi, D., Papale, D., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Gilmanov, T., Granier, A., Grünwald, T., Havránková, K., Ilvesniemi, H., Janous, D., Knohl, A., Laurila, T., Lohila, A., Loustau, D., Matteucci, G., ... Valentini, R. (2005). On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 11(9), 1424–1439. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x>
- Ruimy, A., Saugier, B., & Dedieu, G. (1994). Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D3), 5263–5283. <https://doi.org/10.1029/93JD03221>

Informe final de Proyecto de Investigación

- Running, S. W. (2021). *MODIS/Terra Gross Primary Productivity Gap-Filled 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061*. <https://doi.org/https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A2HGF.061>
- Sri Rahayu Romadhoni, L., As-Syakur, A. R., Hidayah, Z., Budi Wiyanto, D., Safitri, R., Yusuf Satriyana Utama, R., Made Sara Wijana, I., Putra Anugrah, A., & Made Oka Guna Antara, I. (2022). Annual characteristics of gross primary productivity (GPP) in mangrove forest during 2016-2020 as revealed by Sentinel-2 remote sensing imagery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1016(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1016/1/012051>
- Wang, D. (2021). *MODIS/Terra+Aqua Photosynthetically Active Radiation Daily/3-Hour L3 Global 0.05Deg CMG V061 [Data set]*. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. Accessed 2024-09-22 from. <https://doi.org/https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD18C2.061>
- Wang, D. (2024). *MODIS/Terra+Aqua Photosynthetically Active Radiation Daily/3-Hour L3 Global 0.05Deg CMG V062*. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD18C2.062>
- Wang Dongdong, Liang Shunlin, Zhang Yi, Gao Xueyuan, Meredith, B., & Jia Aolin. (2020). A New Set of MODIS Land Products (MCD18): Downward Shortwave Radiation and Photosynthetically Active Radiation. *Remote Sensing*, 15. <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/1/168>
- Wiegand, C. L., Maas, S. J., Aase, J. K., Hatfield, J. L., Pinter, P. J., Jackson, R. D., Kanemasu, E. T., & Lapitan, R. L. (1992). Multisite analyses of spectral-biophysical data for wheat. *Remote Sensing of Environment*, 42(1), 1–21. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90064-Q](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90064-Q)
- World Meteorological Organization. (2025). *World Radiation Data Centre*. <http://wrdc.mgo.rssi.ru/>
- World Meteorological Organization. (2024, October 28). *Green House Gases*. <https://wmo.int/es/news/media-centre/las-concentraciones-de-gases-de-efecto-invernadero-se-disparan-una-vez-mas-nuevo-record-en-2023>
- Xiao, X., Hollinger, D., Aber, J., Goltz, M., Davidson, E. A., Zhang, Q., & Moore, B. (2004). Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 519–534. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.008>
- Xiao, X., Zhang, Q., Saleska, S., Hutrya, L., De Camargo, P., Wofsy, S., Froking, S., Boles, S., Keller, M., & Moore, B. (2005). Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. *Remote Sensing of Environment*, 94(1), 105–122. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.08.015>
- Yuan, W., Cai, W., Liu, S., Dong, W., Chen, J., Arain, M. A., Blanken, P. D., Cescatti, A., Wohlfahrt, G., Georgiadis, T., Genesio, L., Gianelle, D., Grelle, A., Kiely, G., Knohl, A., Liu, D., Marek, M. V., Merbold, L., Montagnani, L., ... Xia, J. (2014). Vegetation-specific model parameters are not required for estimating gross primary production. *Ecological Modelling*, 292, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.08.017>
- Zheng, Y., & Takeuchi, W. (2022). Estimating mangrove forest gross primary production by quantifying environmental stressors in the coastal area. *Scientific Reports*, 12(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06231-6>

Informe final de Proyecto de Investigación

Apéndice

Apéndice 1

Enlaces de códigos desarrollados en Google Earth Engine para consulta de descarga de radiancia y radiación solar.

Datos PAR y de DWSR	Fuente o forma de consulta y descarga
Radiancia captada por piranómetro, de estaciones meteorológicas.	Datos históricos diarios de PAR, de 3 estaciones meteorológicas del Instituto de Cambio Climático y 2 en Mexico, UNAM y Selegua
Geostationay Satellite Server (GOES)	https://colab.research.google.com/drive/1sDLLW9W4Wvf4E_2Moduk5-vBJzgC_koB
Reanálisis de quinta generación del ECMWF (ERA 5)	https://code.earthengine.google.com/?scriptPath=users%2Fdmanzob%2FAnálisisDoctorado%3AECMWF%2FERA5_LAND%2FDAILY_AGGR
Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)	https://code.earthengine.google.com/53a37231b84d4bb76e27041eaa33cfce

Apéndice 2

Código desarrollado en Google Earth Engine para el cálculo de la GPP por cada año con PAR de MODIS ('MODIS/062/MCD18C2'), Sentinel-2 ('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED')

```
// 0. PARÁMETRO AÑO (CAMBIA SOLO ESTO)
// =====
var year = 2019;
// =====
// 1. AOI y parámetros
// =====
var AOI = ee.FeatureCollection('projects/ee-dmanzob/assets/DOC_DIGI/Mangle_190604');
var geometry = AOI.geometry();
Map.centerObject(geometry, 10);
var tile = '15PYR';
var epsilon = 1.83; // gC MJ-1 PAR
// =====
// 2. Función índices espectrales
// =====
function addIndices(image) {
  var refl = image.select(['B2','B4','B8','B11']).divide(10000);
  var evi = refl.expression(
    '2.5 * ((NIR - RED) / (NIR + 6 * RED - 7.5 * BLUE + 1))', {
      NIR: refl.select('B8'),
      RED: refl.select('B4'),
      BLUE: refl.select('B2')
    }).rename('EVI');
```


Informe final de Proyecto de Investigación

```
var lswi = refl.normalizedDifference(['B8','B11']).rename('LSWI');
return image.addBands([evi, lswi]);
}
// =====
// 3. Sentinel-2 año dinámico
// =====
var startDate = ee.Date.fromYMD(year,1,1);
var endDate = ee.Date.fromYMD(year,12,31);
var s2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED')
  .filterDate(startDate, endDate)
  .filterBounds(geometry)
  .filter(ee.Filter.eq('MGRS_TILE', tile))
  .map(addIndices)
  .sort('system:time_start');
print('Número de escenas S2:', s2.size());
// =====
// 4. LSWI máximo anual
// =====
var LSWI_max = s2.select('LSWI').max();
// =====
// 5. Tabla Tescalar dinámica
// =====
var tesc = ee.FeatureCollection(
  'projects/ee-dmanzob/assets/DOC_DIGI/Tesc' + year
);
// Convertir fecha y agregar system:time_start
var tescFormatted = tesc.map(function(f){
  var d = ee.Date.parse('YYYY-MM-dd', f.get('Fecha'));
  return f.set({
    'Fecha_date': d,
    'system:time_start': d.millis()
  });
});
// =====
// 6. GPP diaria
// =====
var gppCollection = s2.map(function(img){
  var date = ee.Date(img.get('system:time_start'));
  var nextDay = date.advance(1,'day');
  // ----- PAR robusto -----
  var parCollection = ee.ImageCollection('MODIS/062/MCD18C2')
    .filterDate(date, nextDay);
  var par = ee.Image(
    ee.Algorithms.If(
      parCollection.size().gt(0),
```

Informe final de Proyecto de Investigación

```
parCollection.first()
  .select([
    'GMT_0000_PAR','GMT_0300_PAR','GMT_0600_PAR','GMT_0900_PAR',
    'GMT_1200_PAR','GMT_1500_PAR','GMT_1800_PAR','GMT_2100_PAR'
  ])
  .reduce(ee.Reducer.sum())
  .multiply(10800)
  .divide(1e6),
ee.Image.constant(0)
)
);
// fAPAR
var fAPAR = img.select('EVI')
  .multiply(1)
  .clamp(0,1);
// Wscalar
var Wscalar = img.expression(
  '(1 + LSWI) / (1 + LSWImax)', {
    LSWI: img.select('LSWI'),
    LSWImax: LSWImax
  });
// ----- Tscalar robusto -----
var filaT = tescFormatted
  .filterDate(date, nextDay)
  .first();
var Tscalar = ee.Image.constant(
  ee.Number(
    ee.Algorithms.If(
      filaT,
      filaT.get('Tescalar'),
      1
    )
  )
);
// GPP diaria
var gpp = par
  .multiply(fAPAR)
  .multiply(Wscalar)
  .multiply(Tscalar)
  .multiply(epsilon)
  .rename('GPP')
  .set('system:time_start', date.millis());
return gpp.clip(geometry);
});
print('Número de imágenes GPP:', gppCollection.size());
```

Informe final de Proyecto de Investigación

```
// =====
// 7. Integración anual (trapecios)
// =====
var sorted = gppCollection.sort('system:time_start');
var list = sorted.toList(sorted.size());
var n = sorted.size();
var weighted = ee.ImageCollection(
  ee.List.sequence(0, n.subtract(2)).map(function(i){
    i = ee.Number(i);
    var img1 = ee.Image(list.get(i));
    var img2 = ee.Image(list.get(i.add(1)));
    var t1 = ee.Date(img1.get('system:time_start'));
    var t2 = ee.Date(img2.get('system:time_start'));
    var delta = t2.difference(t1,'day');
    return img1
      .add(img2)
      .divide(2)
      .multiply(delta);
  })
);
// Manejo seguro si n < 2
var GPP_anual = ee.Image(
  ee.Algorithms.If(
    n.gt(1),
    weighted.sum(),
    ee.Image.constant(0)
  )
).rename('GPP_anual_gC_m2').clip(geometry);
// =====
// 8. Visualización y verificación
// =====
Map.addLayer(GPP_anual, {min:1000, max:3000}, 'GPP anual ' + year);
print('Estadísticas GPP anual:',
  GPP_anual.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.minMax(),
    geometry: geometry,
    scale: 100,
    maxPixels: 1e13
  })
);
// =====
// 9. Exportación automática
// =====
Export.image.toDrive({
  image: GPP_anual,
```

Informe final de Proyecto de Investigación

```
description: 'GPP_anual_' + year + '_gC_m2',  
folder: 'GEE_exports',  
fileNamePrefix: 'GPP_anual_' + year + '_gC_m2',  
region: geometry,  
scale: 10,  
crs: 'EPSG:32615',  
maxPixels: 1e13  
});
```

Apéndice 3

Código desarrollado en Google Earth Engine para generar las series de GPP de MODIS

```
// CONFIGURACIÓN: SOLO CAMBIAR EL AÑO  
// =====  
var year = 2022; // Cambiar 2016–2025  
// =====  
// AOI  
// =====  
var AOI = ee.FeatureCollection('projects/ee-dmanzob/assets/DOC_DIGI/Mangle_220514');  
var geometry = AOI.geometry();  
Map.centerObject(geometry, 8);  
  
// =====  
// Fechas automáticas  
// =====  
var startDate = ee.Date.fromYMD(year, 1, 1);  
var endDate = startDate.advance(1, 'year');  
  
// =====  
// MODIS GPP 8-días  
// =====  
var gppCol = ee.ImageCollection('MODIS/061/MOD17A2HGF')  
  .filterBounds(geometry)  
  .filterDate(startDate, endDate)  
  .select('Gpp');  
  
print('Número de imágenes:', gppCol.size());  
  
// =====  
// Escalamiento (0.0001)  
// =====  
var gppScaled = gppCol.map(function(img){  
  return img.multiply(0.0001);  
});  
  
// =====
```

Informe final de Proyecto de Investigación

```
// Suma anual (kg C m-2 año-1)
// =====
var gppAnnual_kg = gppScaled.sum();

// =====
// Convertir a g C m-2 año-1
// =====
var gppAnnual_g = gppAnnual_kg
  .multiply(1000)
  .rename('GPP_' + year + '_gCm2yr');

// =====
// Recortar estrictamente al AOI
// =====
var gppClipped = gppAnnual_g.clip(AOI);

// =====
// Visualización
// =====
Map.addLayer(
  gppClipped,
  {min: 0, max: 3500, palette: ['white','yellow','green','darkgreen']},
  'GPP ' + year + ' (g C m-2 año-1)'
);

// =====
// Exportar GeoTIFF recortado en UTM 15N
// =====
Export.image.toDrive({
  image: gppClipped,
  description: 'GPP_' + year + '_gCm2yr_MODIS_UTM15N',
  folder: 'GEE_exports',
  fileNamePrefix: 'GPP_' + year + '_gCm2yr_MODIS_UTM15N',
  region: AOI.geometry(), // límite exacto
  scale: 500,
  crs: 'EPSG:32615',
  maxPixels: 1e13
});
```




Informe final de Proyecto de Investigación **Declaración del coordinador (a) del proyecto de investigación**

El coordinador (a) de proyecto de investigación con base en el Reglamento para el desarrollo de los proyectos de **investigación** cofinanciados por medio del Fondo de Investigación, artículo 20, elaboró este informe en función de los datos recabados en el proyecto.

Msc. Daniel Esteban Manzo Barrientos	
Fecha: 22/04/2026)	

Aval del director (a) del instituto, centro, unidad o departamento de investigación o coordinador de investigación del centro regional universitario

De conformidad con el artículo 19 del Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación cofinanciados por medio del Fondo de Investigación otorgo el aval al presente informe final de las actividades realizadas en el proyecto (**escriba el nombre del proyecto de investigación**) en mi calidad de (**indique: director del instituto, centro, unidad o departamento de investigación o coordinador de investigación del centro universitario**), mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

Vo.Bo. Msc. José Roberto Ortiz	
Fecha: dd/mm/año	

Recepción de la Dirección General de Investigación

Vo.Bo. Msc. Andrea Eunice Rodas Moran	
Fecha: dd/mm/año	

/Digi2025