

Olalla, A.; Sierra, S.; Mary, B.; Nieto, H. Sat4Carbon: Integración de teledetección térmica y modelos mecánicos para la cuantificación de flujos de carbono en ecosistemas silvopastorales

Sat4Carbon: Integración de teledetección térmica y modelos mecánicos para la cuantificación de flujos de carbono en ecosistemas silvopastorales

Olalla, Adrián^{1,3} Sierra, Sergio² Mary, Benjamin³ Nieto, Héctor³

¹ Universidad de Alcalá, Grupo de Investigación de Teledetección Ambiental, Colegios 2, Alcalá de Henares 28801, España

² Complutum Tecnologías de la Información Geográfica, España

³ Instituto de Ciencias Agrarias (ICA-CSIC)

ORCID: Olalla 0000-0003-0456-0745 Sierra 0000-0002-0247-2904 Mary 0000-0001-7199-2885 Nieto 0000-0003-4250-6424

Correspondencia: adrian.olalla@edu.uah.es sergio.sierra@complutig.com benjamin.mary@ica.csic.es hector.nieto@ica.csic.es

RESUMEN


El seguimiento preciso del ciclo del carbono en ecosistemas agroforestales es un reto crítico frente al cambio climático. Este trabajo presenta una metodología innovadora que integra modelos mecánicos de fotosíntesis con teledetección multiespectral y térmica del Programa Copernicus (Sentinel-2/3 y Landsat). A diferencia de los modelos tradicionales de eficiencia en el uso de la luz (LUE) basados en ajustes estadísticos, esta aproximación incorpora estimaciones de conductancia estomática derivada de modelos de balance de energía como variable crítica, permitiendo capturar con precisión el impacto del estrés hídrico en la fijación de carbono. La metodología se aplicó en una parcela piloto silvopastoral en Cantabria. Se empleó el modelo de balance energético de dos fuentes (TSEB) con el fin de separar la transpiración de la evaporación y derivar así la conductancia estomática como indicador del estado fisiológico. Este parámetro alimentó un modelo de fotosíntesis basado en Farquhar para calcular flujos diarios de carbono, obteniendo indicadores como la Productividad Primaria Bruta (GPP) y el Intercambio Neto del Ecosistema (NEE). Los resultados de 2024 revelaron variaciones significativas en la fijación de carbono según la densidad vegetal y la humedad del suelo, permitiendo clasificar las parcelas como sumideros o fuentes de CO₂.


Palabras clave: TSEB, Producción Primaria Bruta, Sentinel-2, Sentinel-3, Landsat

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 18 febrero 2026

Sat4Carbon: Integración de teledetección térmica y modelos mecanísticos para la cuantificación de flujos de carbono en ecosistemas silvopastorales

Olalla, Adrián ⁽¹⁾, Sierra, Sergio ⁽²⁾, Mary, Benjamin ⁽³⁾, Nieto, Héctor ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Universidad de Alcalá, Grupo de Investigación de Teledetección Ambiental. Instituto de Ciencias Agrarias (ICA-CSIC), España,  0000-0003-0456-0745, adrian.olalla@edu.uah.es.

⁽²⁾ Complutum Tecnologías de la Información Geográfica, España,  0000-0002-0247-2904, sergio.sierra@complutig.com.

⁽³⁾ Instituto de Ciencias Agrarias (ICA-CSIC),  0000-0001-7199-2885, benjamin.mary@ica.csic.es.

⁽⁴⁾ Instituto de Ciencias Agrarias (ICA-CSIC),  0000-0003-4250-6424, hector.nieto@ica.csic.es.

Resumen: El seguimiento preciso del ciclo del carbono en ecosistemas agroforestales es un reto crítico frente al cambio climático. Este trabajo presenta una metodología innovadora que integra modelos mecanísticos de fotosíntesis con teledetección multiespectral y térmica del Programa Copernicus (Sentinel-2/3 y Landsat). A diferencia de los modelos tradicionales de eficiencia en el uso de la luz (LUE) basados en ajustes estadísticos, esta aproximación incorpora estimaciones de conductancia estomática derivada de modelos de balance de energía como variable crítica, permitiendo capturar con precisión el impacto del estrés hídrico en la fijación de carbono. La metodología se aplicó en una parcela piloto silvopastoral en Cantabria. Se empleó el modelo de balance energético de dos fuentes (TSEB) con el fin de separar la transpiración de la evaporación y derivar así la conductancia estomática como indicador del estado fisiológico. Este parámetro alimentó un modelo de fotosíntesis basado en Farquhar para calcular flujos diarios y anuales de carbono, obteniendo indicadores como la Productividad Primaria Bruta (GPP) y el Intercambio Neto del Ecosistema (NEE). Los resultados de 2024 revelaron variaciones significativas en la fijación de carbono según la densidad vegetal y la humedad del suelo, permitiendo clasificar las parcelas como sumideros o fuentes de CO₂.

Palabras clave: TSEB, Producción Primaria Bruta, Sentinel-2, Sentinel-3, Landsat

Sat4Carbon: Integration of Thermal Remote Sensing and Mechanistic Models for Carbon Flux Quantification in Silvopastoral Ecosystems

Abstract: Accurate monitoring of the carbon cycle in agroforestry ecosystems is a critical challenge in the face of climate change. This work presents an innovative methodology that integrates process-based photosynthesis models with multispectral and thermal remote sensing from the Copernicus Programme (Sentinel-2/3 and Landsat). Unlike traditional empirical Light Use Efficiency (LUE) models, this approach incorporates stomatal conductance from energy balance models as a critical variable, allowing for the precise capture of water stress effects on carbon uptake. The methodology was validated in one silvopastoral pilot plot located in Cantabria. The Two-Source Energy Balance (TSEB) model was used to partition transpiration from evaporation and then derive stomatal conductance as an indicator of physiological status. This parameter was fed into a Farquhar-based photosynthesis model to calculate daily and annually carbon fluxes, obtaining key indicators such as Gross Primary Productivity (GPP) and Net Ecosystem Exchange (NEE). The 2024 results revealed significant variations in carbon fixation depending on vegetation density and soil moisture, allowing the plots to be classified as either carbon sinks or sources.

Keywords: TSEB, GPP, Sentinel-2, Sentinel-3, Landsat

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población mundial y la consecuente demanda de alimentos, fibras y combustibles han intensificado las prácticas de producción agrícola y forestal, ejerciendo una presión sin precedentes sobre los recursos naturales en un contexto de cambio climático. A pesar de que los ecosistemas agroforestales

poseen un enorme potencial para el secuestro de carbono y el mantenimiento de la biodiversidad, existe una falta de conocimiento preciso que limita la evaluación de su impacto real en la dinámica del ciclo del carbono. Los pastizales de montaña, por ejemplo, son tanto una actividad productiva como una fuente crítica de fijación de carbono atmosférico (Miglietta *et al.*, 2006).

En la actualidad, las directrices del IPCC proporcionan un marco básico para informes de gases de efecto invernadero (IPCC, 2006). Por otro lado, aunque las estimaciones *in situ* mediante torres de flujo "Eddy Covariance" (EC) son altamente precisas, su elevado coste de mantenimiento limita su despliegue a estudios científicos puntuales, lo que dificulta la generalización de sus datos en grandes extensiones de terreno o en formaciones vegetales sin instrumentación cercana (Miglietta *et al.*, 2006). Un enfoque prometedor para superar estas limitaciones es el uso de modelos de producción primaria basados en teledetección, que aprovechan la capacidad de los sensores espaciales para ofrecer una cobertura sinóptica, sistemática y objetiva de la superficie terrestre. Tradicionalmente, estos modelos se han basado en el concepto de eficiencia en el uso de la luz (LUE) que establece relaciones semi-empíricas entre la radiación absorbida por la vegetación y la asimilación de CO₂ (Liu *et al.*, 2018). Sin embargo, los modelos LUE dependen fuertemente de medidas de campo para su calibración, lo que restringe su aplicación a las regiones donde han sido validados y supone una barrera en áreas deficientes en torres EC (Liu *et al.*, 2018). Como alternativa, los modelos mecanísticos de fotosíntesis (basados en el modelo de Farquhar *et al.*, 1980) ofrecen una aproximación más física al simular la actividad enzimática de las hojas. Aunque son más complejos, su base físico-química les otorga un mayor potencial de generalización y escalabilidad (Farquhar *et al.*, 1980; Liu *et al.*, 2018). No obstante, su principal limitación actual es que suelen alimentarse solo con datos de teledetección en el espectro de onda corta, ignorando el grado de apertura o cierre estomático en condiciones de estrés hídrico. En regiones como la Mediterránea, el estrés hídrico provoca el cierre de estomas para conservar agua, lo que reduce drásticamente la fijación de carbono (Tuzet *et al.*, 2003).

Investigaciones recientes han demostrado que la teledetección térmica permite no solo monitorear la evapotranspiración mediante modelos de balance energético como TSEB (Norman *et al.* 1995) sino también obtener estimaciones directas de la conductancia estomática (Nieto *et al.*, 2022). Esta variable puede integrarse en funciones de suministro de CO₂ para calcular de forma más robusta la fijación de carbono, incluso bajo condiciones de estrés hídrico (Farquhar *et al.*, 1980; Tuzet *et al.*, 2003). A pesar de estos avances, existe aún una brecha en la aplicación operativa de estos productos de base física en la gestión agronómica (Guzinski *et al.* 2023).

El programa Copernicus ha mejorado la disponibilidad de datos de alta resolución temporal y espacial (Sentinel-2), pero persisten retos en la resolución de las imágenes térmicas necesarias para detectar el estrés hídrico (Guzinski *et al.* 2023). Por tanto, los objetivos principales del estudio son, (1) desarrollar una metodología sólida, estandarizada y escalable que permita realizar el seguimiento de la fijación de carbono a largo plazo en diversas regiones y a diferentes escalas espaciales mediante (2) la integración de la teledetección térmica en modelos mecanísticos para obtener estimaciones directas de la conductancia estomática y (3) aplicarlo en

una parcela piloto de ecosistema silvopastoral para poder apoyar la gestión sostenible y las políticas de mitigación.

2. MÉTODOS

Se ha seleccionado una parcela piloto en la Mancomunidad de Campoo-Cabuerniga (Cantabria). Se ha priorizado el ecosistema silvopastoral debido a su papel crucial en la captura de carbono y su resiliencia ante eventos climáticos extremos. Asimismo, la elección de esta zona facilita la evaluación de los beneficios de una gestión sostenible del territorio, tales como el uso de ganadería extensiva y la reducción de la carga de combustible para prevenir incendios, asegurando que la parcela sirva como laboratorio operativo para cuantificar la fijación de carbono en biomasa y suelo.

El modelo de balance energético de dos fuentes (TSEB) propuesto por Norman *et al.*, (1995) se integra con variables biofísicas y la temperatura radiométrica de la superficie. Mas específicamente, se obtienen variables clave como el Índice de Área Foliar (LAI), su fracción verde y el albedo mediante Sentinel-2, las cuales se combinan con la temperatura superficial de Sentinel-3 y Landsat (Guzinski *et al.* 2023). El modelo TSEB particiona dicha temperatura en componentes de suelo y vegetación, estimando los flujos de calor latente y sensible (Norman *et al.* 1995) y su reparto entre el suelo y el dosel vegetal. La transferencia de calor se regula mediante un conjunto de resistencias en serie, que modula el transporte turbulento de calor y agua. Con esas resistencias aerodinámicas y estimaciones de transpiración derivadas con TSEB, permiten derivar la conductancia estomática, facilitando la cuantificación precisa de la asimilación de carbono (Tuzet *et al.*, 2003).

La metodología para la estimación de los flujos de carbono diarios (Fig. 1) se fundamenta en el modelo mecanístico de fotosíntesis de Farquhar *et al.*, (1980), acoplado a las mismas variables biofísicas utilizadas en TSEB y las estimaciones de conductancia estomática obtenidas anteriormente.

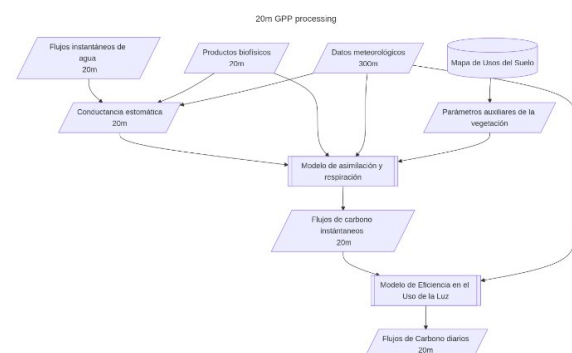


Figura 1. Flujo de trabajo del modelo de balance de carbono.

Finalmente, se calculan los mapas de productividad primaria bruta (GPP) mediante la integración de flujos instantáneos y se incorporan modelos de respiración del suelo planteados en Lloyd & Taylor (1994) para

determinar el intercambio neto del ecosistema (NEE). El escalado de datos instantáneos de GPP a diarios ($\text{gC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) se realiza bajo la premisa de que la eficiencia en el uso de la luz (LUE) se mantiene constante durante todo el fotoperiodo diario.

3. RESULTADOS

En un primer lugar, se realizó una evaluación cuantitativa preliminar del desempeño del modelo mecanístico de asimilación de carbono utilizando datos de torres *Eddy Covariance* (EC) procedentes de la base de datos ICOS "Warm Winter 2020". Para ello se utilizaron como fuentes de entrada los productos biofísicos de Sentinel-2 y datos *in situ* de temperatura de superficie estimados a partir de radiómetros del sistema EC. A escala anual, a partir de datos interpolados y agregados, el modelo mantiene un buen rendimiento, con $r = 0.72$, $\text{RMSE} = 352 \text{ gC m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ y una infraestimación promedio de $101 \text{ gC m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ (figura 2).

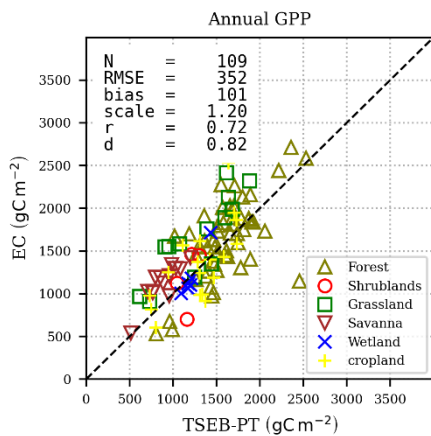


Figura 2. Validación preliminar del modelo mecanístico de asimilación de carbono combinando datos *in situ* y de Sentinel-2 agregados anualmente.

Con respecto a los resultados específicos en la zona de estudio se observa que la cantidad total de carbono fijado varía significativamente de forma intra-parcelaria, condicionada por la heterogeneidad de la cobertura vegetal local (Figura 3). Los valores más elevados de GPP se concentran en los sectores con una mayor densidad de vegetación fotosintéticamente activa, lo que evidencia una capacidad superior de captación de CO_2 . Por el contrario, la parcela presenta zonas con una asimilación de carbono reducida, asociadas a sectores con ausencia de vegetación funcional. Esta variabilidad espacial subraya la importancia de utilizar sensores de alta resolución como Sentinel-2 para capturar con precisión los contrastes en la productividad primaria bruta dentro de un mismo ecosistema silvopastoral.

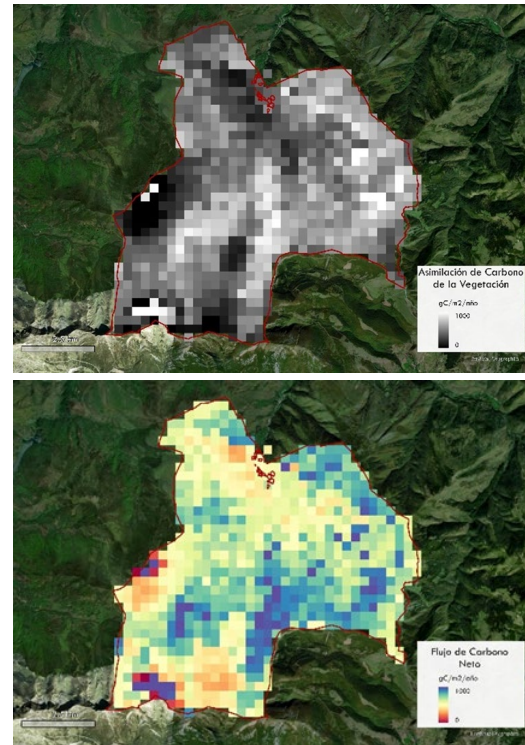


Figura 3. Producción primaria anual neta ($\text{gC m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) (superior) y flujo de carbono anual neto ($\text{gC m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) en la parcela de estudio (inferior) para el año 2024.

Los resultados de 2024 permitieron clasificar los diferentes sectores según su función ecológica específica. Debido a la heterogeneidad del terreno, se identificaron áreas que actuaron como sumideros de carbono (NEE negativo). Por el contrario, en aquellos puntos de la parcela con asimilación nula, el balance resultó en una función de fuente de carbono (NEE positivo), ya que las pérdidas por respiración no fueron compensadas por ninguna captura fotosintética activa.

4. CONCLUSIONES

Se ha presentado un método operativo que integra modelos mecanísticos y teledetección térmica, lo cual representa un avance fundamental frente a las limitaciones de los modelos de eficiencia en el uso de la luz (LUE). De hecho, la teledetección térmica permite proporcionar estimaciones directas del estrés hídrico y la conductancia estomática mediante modelos de balance energético como TSEB, lo cual es esencial para modelar con robustez la fijación de carbono bajo condiciones de estrés hídrico. La eficacia de esta metodología que combina datos de onda corta y datos térmicos con algoritmos acoplados de fotosíntesis y transpiración, optimiza la cuantificación de flujos diarios y anuales frente a productos globales de menor resolución. No obstante, esta evaluación cualitativa debe complementarse con una validación cuantitativa frente a datos *in situ*. Dada la falta de datos EC en las zonas de estudio, la siguiente línea de trabajo se centrará en validar el modelo en zonas climáticas y ecosistemas similares dentro de la red ICOS europea.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias a las Ayudas para la realización de doctorados industriales en la Comunidad de Madrid (IND2024/AMB-34867) y al Grupo Operativo Sat4Carbon, Proyecto financiado por el Plan Estratégico de la PAC – FEDER.

B.M. cuenta con el apoyo de la ayuda “RyC2023-045040-I”, financiada por el MICIU/AEI (ayuda nº 10.13039/501100011033) y el FSE.

6. REFERENCIAS

- Farquhar, G. D., von Caemmerer, S., & Berry, J. A. (1980). A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, *149*(1), 78–90. <https://doi.org/10.1007/BF00386231>
- Guzinski, R., Nieto, H., Sánchez, R. R., Sánchez, J. M., Jomaa, I., Zitouna-Chebbi, R., Rouspard, O., & López-Urrea, R. (2023). Improving field-scale crop actual evapotranspiration monitoring with Sentinel-3, Sentinel-2, and Landsat data fusion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *125*, 103587. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103587>
- IPCC. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. (H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe, Eds.). Institute for Global Environmental Strategies (IGES).
- Liu, Z., Hu, M., Hu, Y., & Wang, G. (2018). Estimation of net primary productivity of forests by modified CASA models and remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, *39*(4), 1092–1116. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1381352>
- Lloyd, J., & Taylor, J. A. (1994). On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, *8*, 315–323.
- Miglietta, F., Gioli, B., Hutjes, R. W. A., & Reichstein, M. (2006). Net regional ecosystem CO₂ exchange from airborne and ground-based eddy covariance, land-use maps and weather observations. *Global Change Biology*, *13*(3), 548–560. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01219.x>
- Nieto, H., Alsina, M.M., Kustas, W.P., García-Tejera, O., Chen, F., Bambach, N., Gao, F., Alfieri, J.G., Hipps, L.E., Prueger, J.H., McKee, L.G., Zahn, E., Bou-Zeid, E., McElrone, A.J., Castro, S.J., Dokoozlian, N., (2022). Evaluating different metrics from the thermal-based two-source energy balance model for monitoring grapevine water stress. *Irrigation Science* *40*, 697–713. doi:10.1007/s00271-022-00790-2.
- Norman, J. M., Kustas, W. P., & Humes, K. S. (1995). Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, *77*(3-4), 263–293. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02265-Y](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02265-Y)
- Tuzet, A., Perrier, A., & Leuning, R. (2003). A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant, Cell & Environment*, *26*(7), 1097–1116. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.01035.x>