

Cristóbal Rosselló, J.; Bozorgi, M.; Altava-Ortiz, V. Detección de períodos severos de sequía en zonas forestales protegidas mediante análisis del balance hídrico estimado mediante Teledetección

Detección de períodos severos de sequía en zonas forestales protegidas mediante análisis del balance hídrico estimado mediante Teledetección

Cristóbal Rosselló, Jordi ¹ Bozorgi, Mahsa ² Altava-Ortiz, Vicent ³

¹ Universitat Autònoma de Barcelona, España

² Programa de l'Ús Eficient de l'Aigua en Agricultura, IRTA

³ Servei Meteorològic de Catalunya, Generalitat de Catalunya

ORCID: Cristóbal Rosselló 0000-0001-6244-4289 Bozorgi 0009-0006-2935-2597 Altava-Ortiz 0000-0001-6974-1905

Correspondencia: jordi.cristobal@uab.cat Mahsa.Bozorgi@irta.cat vicent.altava@gencat.cat

RESUMEN

La sequía, como evento climático extremo con presencia creciente a nivel mundial, desempeña un papel importante en la gestión forestal y conservación de espacios naturales, especialmente en la cuenca mediterránea. Este estudio estima el balance hídrico superficial a escala regional en la Reserva de la Biosfera del Montseny mediante el análisis de estimaciones de evapotranspiración (ET) obtenidas por Teledetección mediante datos Sentinel (2017-2022) y Terra/Aqua MODIS (2000-2022) aplicando el modelo TSEB (Two-Source Energy Balance) para evaluar la dinámica del balance hídrico en dos cuencas forestales monitorizadas. Los resultados muestran que el marco de modelización SenET con datos Sentinel y MODIS se aplicó exitosamente a escala regional, con un RMSE medio aproximado de 1 mm-día⁻¹. Se identificaron dos períodos severos de sequía (2006-2007 y 2021-2022) mediante el análisis de anomalías del balance hídrico superficial. La ET mostró una tendencia negativa mientras que la ET potencial presentó tendencia positiva durante 2017-2022, capturando de forma efectiva el período de sequía severa.


Palabras clave: *Evapotranspiración, Balance hídrico, TSEB, Sequía, Montseny*

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


DetECCIÓN DE PERÍODOS SEVEROS DE SEQUÍA EN ZONAS FORESTALES PROTEGIDAS MEDIANTE ANÁLISIS DEL BALANCE HÍDRICO ESTIMADO MEDIANTE TELEDETECCIÓN

Cristóbal Rosselló, Jordi ⁽¹⁾, Bozorgi, Mahsa ⁽²⁾, Altava-Ortiz, Vicent ⁽³⁾


⁽¹⁾ Universitat Autònoma de Barcelona, España.

 0000-0001-6244-4289, jordi.cristobal@uab.cat

⁽²⁾ Programa de l'Ús Eficient de l'Aigua en Agricultura, IRTA.

 0009-0006-2935-2597, Mahsa.Bozorgi@irta.cat

⁽³⁾ Servei Meteorològic de Catalunya, Generalitat de Catalunya.

 0000-0001-6974-1905, vicent.altava@gencat.cat.

Resumen: La sequía, como evento climático extremo con presencia creciente a nivel mundial, desempeña un papel importante en la gestión forestal y conservación de espacios naturales, especialmente en la cuenca mediterránea. Este estudio estima el balance hídrico superficial a escala regional en la Reserva de la Biosfera del Montseny mediante el análisis de estimaciones de evapotranspiración (ET) obtenidas por Teledetección mediante datos Sentinel (2017-2022) y Terra/Aqua MODIS (2000-2022) aplicando el modelo TSEB (*Two-Source Energy Balance*) para evaluar la dinámica del balance hídrico en dos cuencas forestales monitorizadas. Los resultados muestran que el marco de modelización SenET con datos Sentinel y MODIS se aplicó exitosamente a escala regional, con un RMSE medio aproximado de 1 mm·día⁻¹. Se identificaron dos períodos severos de sequía (2006-2007 y 2021-2022) mediante el análisis de anomalías del balance hídrico superficial. La ET mostró una tendencia negativa mientras que la ET potencial presentó tendencia positiva durante 2017-2022, capturando de forma efectiva el período de sequía severa.

Palabras clave: Evapotranspiración, Balance hídrico, TSEB, Sequía, Montseny

Detection of severe drought periods in protected forest areas through analysis of the water balance estimated using remote sensing.

Abstract: Drought, as an extreme climatic event with growing presence worldwide, plays an important role in forestry management and conservation of natural areas, especially in the Mediterranean basin. This study estimates the regional surface water balance in the Montseny Biosphere Reserve through analysis of remote sensing evapotranspiration (ET) estimates. Sentinel data (2017-2022) and Terra/Aqua MODIS data (2000-2022) were used applying the TSEB (*Two-Source Energy Balance*) model to evaluate water balance dynamics in two monitored forested catchments. Results show that the SenET modeling framework with Sentinel and MODIS data was successfully applied at regional scale, with evaluation yielding mean RMSE of approximately 1 mm·day⁻¹. Two severe drought periods (2006-2007 and 2021-2022) were identified through surface water balance anomaly analysis. ET showed a negative trend while potential ET presented a positive trend during 2017-2022, effectively capturing the severe drought period.

Keywords: Evapotranspiration, Water balance, TSEB, Drought, Montseny

1. INTRODUCCIÓN

La sequía representa uno de los eventos climáticos extremos con mayor impacto en la gestión forestal y la conservación de espacios naturales protegidos. En la cuenca mediterránea, este fenómeno adquiere especial relevancia debido a la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales frente al cambio climático. La expansión de la

masa forestal derivada de la forestación de antiguos cultivos y campos de pastoreo favorece la naturalización del territorio, pero también conduce a alteraciones del balance hídrico tanto a escala local como regional. Este incremento de la cobertura forestal tiene efectos significativos sobre el aumento del riesgo de incendios forestales, así como sobre la disminución del caudal de agua necesario para mantener la fauna y flora,

especialmente en hábitats riparios. La cuantificación precisa del balance hídrico y de uno de sus principales componentes, la evapotranspiración (ET), resulta fundamental para comprender estas dinámicas hídricas y establecer estrategias de gestión adaptativa en áreas protegidas.

El objetivo principal de este estudio es estimar el balance hídrico superficial a escala regional en la Reserva de la Biosfera - Parque Natural del Montseny (RB-PNM) mediante el análisis de estimaciones de ET obtenidas por Teledetección. Para ello se usarán datos Sentinel para el período 2017-2022 y datos Terra/Aqua MODIS para el período extendido 2000-2022, permitiendo identificar dos períodos severos de sequía y evaluar sus impactos en cuencas forestales monitorizadas a largo plazo.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La RB-PNM se localiza en el noreste de la Península Ibérica, constituyendo un espacio natural protegido de alto valor ecológico (Fig. 1). La evaluación del balance hídrico de este estudio se centra en la cuenca experimental de la Castanya donde hay dos cuencas instrumentadas con un registro de caudal superficial del agua de más de 30 años de datos: la cuenca TM0, con una superficie de 2.05 km², y la cuenca TM9, con 0.05 km² (Fig. 1). Cada cuenca tiene una estación de aforo que proporcionan datos continuos de caudal y precipitación necesarios para evaluar las estimaciones del balance hídrico superficial. Ambas cuencas se encuentran en el área núcleo de la RB-PNM, caracterizadas por ecosistemas forestales mediterráneos de montaña formados por encinares (*Quercus ilex*) (85%), hayedos (*Fagus sylvatica*) (10%) y matorrales sub-alpinos (*Juniperus communis subsp. Alpina*, *Calluna vulgaris*) en las zonas culminales (5%). La diversidad altitudinal y la heterogeneidad de la cobertura forestal en estas cuencas las convierten en sitios representativos para evaluar la respuesta hidrológica de los ecosistemas mediterráneos de montaña frente a eventos de sequía.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Modelización de la evapotranspiración

La estimación de la ET instantánea se realizó mediante el modelo TSEB (*Two-Source Energy Balance model*) desarrollado por Norman *et al.* (1995). Este modelo separa la contribución del suelo y la vegetación en el balance energético superficial, proporcionando estimaciones robustas de ET en ecosistemas heterogéneos.

Para su cálculo diario a nivel regional se implementó el marco de modelización SenET utilizando la librería pyTSEB (github.com/hectornieto/pyTSEB) con datos Sentinel-2 a 20m de resolución espacial para el período 2017-2022, siguiendo las metodologías validadas por Guzinski *et al.* (2021); y su reciente implementación con datos MODIS desarrollado por Bozorgi *et al.* (2023) con una resolución espacial de 1000m para el período 2000-2022.

El método SenET ha sido extensamente validado con datos de torres de flujos de energía en zonas de vegetación natural y cultivos presentado, en general, un RMSE promedio igual o inferior a 1 mm·día⁻¹. En el caso de su aplicación con imágenes MODIS, se obtuvo un RMSE medio de 1.2 mm·día⁻¹ evaluado con datos de 11 estaciones de flujos de energía de la red FLUXNET. Aun así, es necesario evaluarlo en zonas forestales a escala de cuenca.

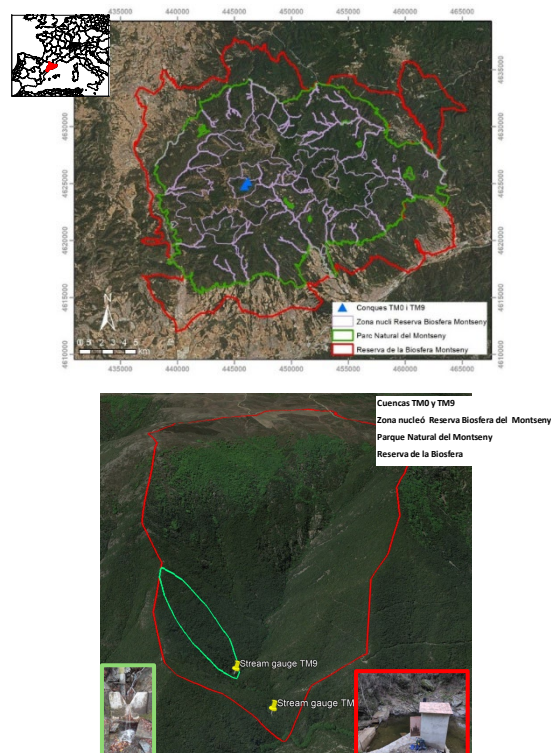


Figura 1. Zona de estudio del RB-PNM, coordenadas en UTM-31N ETRS89 (panel superior). Ubicación y detalle de las cuencas experimentales de la Castanya (imagen de fondo Google Earth) con imágenes de los aforos.

3.2. Modelización de la precipitación

La estimación espacial de precipitación se realizó mediante análisis de regresión múltiple e interpolación de residuos. Las covariables que se utilizaron en la modelización de la precipitación fueron la altitud, la distancia al mar y la latitud extraídas de un MDE. Se utilizaron datos de estaciones meteorológicas del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) y la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para generar campos continuos de precipitación a nivel diario a la resolución espacial de los datos de Teledetección (20 y 1000m, para Sentinel-2 y MODIS, respectivamente).

3.3. Estimación del balance hídrico superficial

El balance hídrico superficial se calculó como la diferencia entre precipitación y evapotranspiración (P-ET) para cada año hidrológico a partir de los datos diarios de la ET y de la P modelizados. Posteriormente, se generaron series temporales de anomalías del balance hídrico con respecto a la media del período para identificar años de déficit o superávit hídrico comparados con los datos de las cuencas experimentales.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación de la ET y dinámica temporal

La evaluación de las estimaciones de ET mediante datos Sentinel-2, Terra MODIS y Aqua MODIS mostró valores de RMSE generalmente iguales o inferiores a $1.1 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ (Tabla 1). Los datos de Aqua MODIS presentaron los mejores resultados, con RMSE promedio de $0.8 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ para el conjunto de años evaluados, mientras que Terra MODIS obtuvo $0.9 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$. Por otro lado, la ET modelizada con datos Sentinel alcanzó un RMSE promedio de $1.1 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ (Tabla 1). Estos datos son comparables con los descritos por otros estudios en zonas de vegetación natural y de cultivos (Guzinski *et al.*, 2021).

El último evento extremo de sequía en Catalunya se originó durante el período 2019 al 2024. El análisis temporal conjunto de la ET de Sentinel y MODIS desde 2017 a 2022 mostró una tendencia progresiva y decreciente de la ET (la Figura 2 muestra las líneas de tendencia y las respectivas funciones, así como al el R^2), mientras que la ET potencial presentó tendencia creciente, evidenciando el incremento de la demanda evaporativa atmosférica en el contexto de la sequía. Teniendo en cuenta la adaptación de la vegetación mediterránea y en especial de las esclerófilas a la sequía, se puede observar también la resistencia de esta a la pérdida de agua. Aún así, cabe remarcar la presencia de individuos de encina muertos debido a las diversas sequías consecutivas alrededor de las cuencas experimentales de la Castanya. La Figura 2 no refleja cambios en la dinámica de la ET debido a la mortalidad de encinas ya los efectos de la sequía sobre vegetación natural normalmente requieren de series temporales más extensas que actualmente se están procesando para el área de estudio.

Tabla 1. Evaluación de la ET en las cuencas experimentales de la Castanya.

Año hidrológico	RMSE ($\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$)		
	Sentinel	Terra	Aqua
2000-2001		0.5	
2001-2002		0.3	
2007-2008		1.2	0.6
2008-2009		1.2	0.9
2009-2010		1.3	1.2
2011-2012		0.5	0.2
2012-2013		0.6	0.4
2014-2015		0.8	0.6
2015-2016		1.1	0.8
2016-2017		0.8	0.6
2017-2018	1.4	1.5	1.4
2021-2022	0.9	1.1	0.9
Promedio	1.1	0.9	0.8

4.2. Dinámica del balance hídrico superficial

El análisis del balance hídrico superficial mediante datos Aqua MODIS para el período 2000-2022 reveló variabilidad interanual significativa, con valores que oscilaron entre déficits superiores a $-300 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ y superávits superiores a $700 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ (Figura 3). Los

años hidrológicos 2007-2008, 2011-2012, 2021-2022 presentaron anomalías negativas pronunciadas, indicando condiciones de sequía. Los datos Sentinel para el período 2017-2022 confirmaron el patrón de déficit hídrico, particularmente intenso durante los años 2021-2022. La distribución espacial del balance hídrico mostró mayor déficit en áreas de menor altitud y mayor densidad forestal, mientras que las zonas de alta montaña mantuvieron balances más equilibrados (Figura 4). Durante el año hidrológico 2020-2021 el temporal Gloria afectó el área de estudio produciendo un balance hídrico positivo pero que colmató el aforo las cuencas de estudio haciendo imposible la toma de datos de caudal y la posterior evaluación del balance hídrico durante el siguiente año hidrológico. Aun así, los efectos de la sequía aún persistieron hasta el final de la serie analizada.

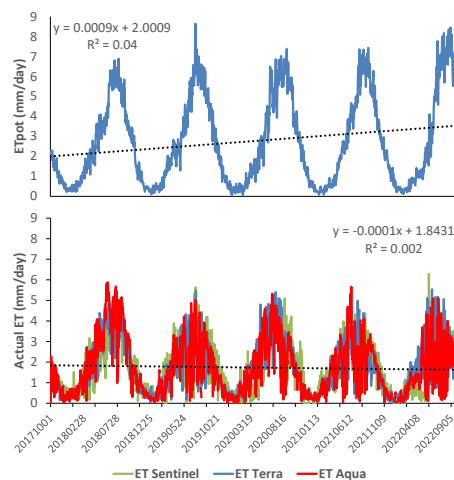


Figura 2. Dinámica del promedio de la ET y de la ET potencial en las cuencas experimentales de la Castanya para el periodo 2017-2022. Se incluyen las líneas de tendencia, su función y el R^2 .

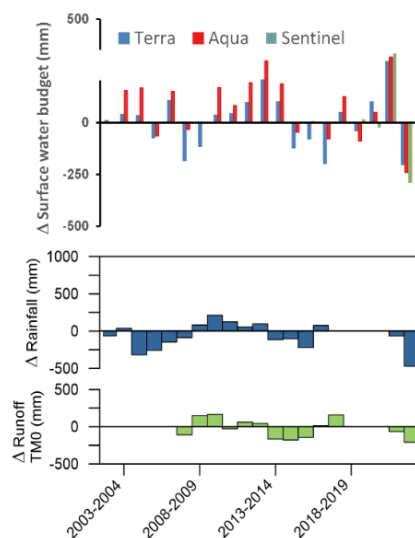


Figura 3. Anomalías de la escorrentía, precipitación y del balance hídrico calculado con datos MODIS y Sentinel-2 y modelización SIG de la precipitación en las cuencas experimentales de la Castanya para el periodo 2000-2022.

4.3. Dinámica de las anomalías del balance hídrico superficial

El análisis de anomalías para el período reciente (2000-2022) identificó dos eventos de sequía severa. El primero, iniciado en 2006-2007, se extendió varios años con anomalías que alcanzaron -500 mm en algunas áreas. El segundo, correspondiente al bienio 2021-2022, presentó anomalías similares en magnitud, afectando extensamente la RB-PNM. Los tres sensores (Terra, Aqua y Sentinel) capturaron consistentemente estos eventos de sequía, aunque con ligeras diferencias en la magnitud de las anomalías. La concordancia entre sensores refuerza la robustez de las estimaciones y confirma la severidad de los períodos de déficit hídrico identificados.

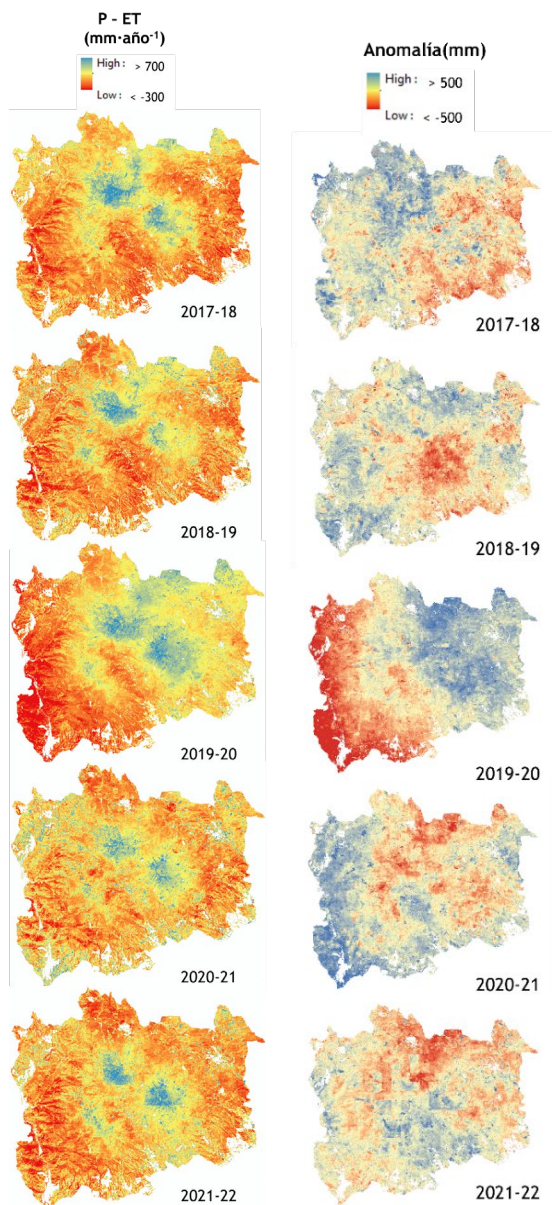


Figura 3. Balance hídrico (P-ET) y anomalías estimadas con datos Sentinel para el período 2017-2022.

5. CONCLUSIONES

El marco de modelización SenET con datos Sentinel y MODIS se aplicó exitosamente a escala regional en la RB-PNM, obteniendo evaluaciones con un RMSE promedio aproximado de 1 mm·día⁻¹ a escala de cuenca, siendo Aqua MODIS el sensor con mejores resultados. La ET mostró una tendencia negativa mientras que la ET potencial exhibió tendencia positiva durante 2017-2022, capturando efectivamente el período de sequía severa reciente en Catalunya.

El análisis de anomalías del balance hídrico superficial identificó claramente los períodos severos de sequía iniciados en 2006-2007 y 2021-2022, proporcionando información valiosa para la gestión forestal adaptativa de espacios naturales protegidos en el contexto mediterráneo. Estos resultados destacan la utilidad de la Teledetección para el monitoreo continuo de la disponibilidad hídrica en ecosistemas forestales vulnerables al cambio climático.

La investigación futura se orientará hacia la mejora de la modelización de ET mediante parametrización local del modelo TSEB (coeficiente Priestly-Taylor y del LAI), utilización de datos de reanálisis de mayor resolución espacial (ERA-Land) y la aplicación del modelo DTD (Anderson *et al.*, 1997). Asimismo, se extenderá el análisis de anomalías utilizando datos Landsat de resolución media (30 metros) desde 1984 hasta la actualidad, permitiendo una perspectiva temporal más amplia de las dinámicas hídricas en la región.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto ET4DROUGHT (PID2021-127345OR-C31) y CALIB-FIRE (PID2023-151124NB-I00). Los autores agradecen a la RB-PNM por facilitar datos e infraestructura para la realización de este estudio.

7. REFERENCIAS

- Anderson, M. C., Norman, J. M., Diak, G. R., Kustas, W. P., & Mecikalski, J. R. (1997). A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 60(2), xx-xx. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00215-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00215-5)
- Bozorgi, M., Cristóbal, J., & Pàmies-Sans, M. (2024). Evaluating the two-source energy balance model using MODIS data for estimating evapotranspiration time series on a regional scale. *Remote Sensing*, 16(23), 4587. <https://doi.org/10.3390/rs16234587>
- Guzinski, R., Nieto, H., Sandholt, I., & Karamitilios, G. (2020). Modelling high-resolution actual evapotranspiration through Sentinel-2 and Sentinel-3 data fusion. *Remote Sensing*, 12(9), 1433. <https://doi.org/10.3390/rs12091433>
- Norman, J., Kustas, W., & Humes, K. (1995). A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes from observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77, 263-293. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02265-Y](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02265-Y)