Stima dell'evapotraspirazione reale in aree mediterranee mediante dati telerilevati ottici e termici

Marta Chiesi[1][0000-0003-3459-6693] Luca Angeli[2][0000-0002-6064-7514], Piero Battista[1][0000-0003-1858-9653], Luca Fibbi[1][0000-0001-6985-6809], Maurizio Pieri[1][0000-0003-0930-8346], Bernardo Rapi[1][0000-0002-3089-5664], Francesco Sabatini[1] e Fabio Maselli[1] [0000-0001-6475-4600]

[1] CNR IBE, e-mail: nome.cognome@cnr.it
[2] Consorzio LaMMA, e-mail: angeli@lamma.toscana.it

Abstract. L'evapotraspirazione reale (ETa) è una componente fondamentale del ciclo dell'acqua a scala territoriale, sempre più influenzata dall'aumento delle temperature dovuto ai cambiamenti climatici. Questo fenomeno è particolarmente evidente nell'area mediterranea, dove è necessario promuovere una gestione sostenibile delle risorse idriche per ottimizzarne l'utilizzo prevenendo gli sprechi. Ciò comporta l'importanza di monitorare nel tempo le variazioni di ETa su vasta scala, cosa che può essere fatta utilizzando dati telerilevati.
Le tecniche di stima dell'ETa tramite dati satellitari sono generalmente classificate in metodi energy balance, water balance e miste.
Questo studio valuta la capacità di stimare l'ETa ad alta risoluzione spazio-temporale mediante l'applicazione di due approcci distinti: il modello energy balance Sen-ET ed il modello water balance NDVI-Cws, entrambi alimentati da dati della costellazione Sentinel. Le stime prodotte da Sen-ET sono state preliminarmente sottoposte a procedure di gap-filling al fine di ottenere serie giornaliere complete. La prestazione dei due metodi è stata successivamente valutata utilizzando osservazioni raccolte a terra in tre aree di studio in Toscana, tra cui un prato-pascolo, una coltura arborea (oliveto) ed una coltura annuale (grano). I risultati preliminari evidenziano la diversa sensibilità dei due metodi nel riconoscere e descrivere le variazioni giornaliere di ETa nelle tipologie di ecosistema considerato. In particolare, il metodo NDVI-Cws mostra prestazioni migliori nel simulare la ETa delle superfici in esame, che sono dovute soprattutto alla maggiore risoluzione spaziale dei dati di ingresso.

Parole chiave: dati ottici, dati termici, Sen-ET, NDVI-Cws.

1 Introduzione

L'evapotraspirazione reale (ETa), nelle sue due componenti di traspirazione legata alla biomassa verde e di evaporazione dal suolo, è una delle principali variabili del bilancio idrico ed è fortemente legata alle caratteristiche di un territorio (e.g. fattori meteorologici, tipologia di vegetazione, caratteristiche del suolo, etc.) [1]. Nell'ottica di promuovere un uso sostenibile delle risorse idriche quindi, quantificare l'ETa è

particolarmente importante soprattutto in aree in cui tali risorse possono essere un fattore limitante per lo sviluppo della vegetazione e, più in generale, delle diverse attività umane. Ciò comporta la necessità di lavorare su ampia scala e quindi richiede la messa a punto di metodologie di stima che possano essere operative e facili da applicare, soprattutto in aree mediterranee disomogenee e frammentate. In questo contesto l'uso del telerilevamento offre notevoli opportunità, perché è in grado di fornire informazioni su vaste aree in maniera sinottica, a diverse risoluzioni spaziali e temporali [2].

Le metodologie comunemente adottate possono essere raggruppate in due categorie principali più una terza, "mixed". Le prime, energy balance, sono fisicamente basate e teoricamente efficienti ma soggette a problemi di sotto-campionamento sia spaziale che temporale. Recentemente, questi problemi sono stati affrontati tramite tecniche di fusione dei dati con diverse caratteristiche ed un esempio di questo approccio è fornito dall'algoritmo Sen-ET [3,4]. Le seconde, ovvero i metodi water balance, sono invece di tipo semi-empirico e meno influenzati da problemi di risoluzione spazio-temporale, anche se generalmente non riescono a considerare correttamente l'effetto dello stress idrico sulla vegetazione. Questo limite è stato in buona parte superato nel metodo NDVI-Cws che tratta separatamente le superfici traspiranti e quelle evaporanti e considera sia gli effetti dovuti a stress transitori di breve durata che quelli a lungo termine [5].

La fusione di stime ottenute dai due metodi fondamentali potrebbe superare i rimanenti ostacoli per la produzione di un dataset completo di ETa giornaliero ad alta risoluzione (10-20 m), come proposto anche da Melton et al. [6]. Nel presente lavoro, tale approccio viene valutato con riferimento ad un'area mediterranea caratterizzata da elevata frammentazione ed eterogeneità spaziale della copertura del suolo. In particolare, dopo aver descritto i metodi di stima impiegati, vengono introdotti i siti di studio ed i relativi dati a terra; vengono poi descritti i dati utilizzati dai due modelli, la loro applicazione nei siti selezionati ed il successivo confronto tra i riferimenti a terra e le corrispondenti stime di ETa. L'ultima sezione del lavoro riporta la discussione dei risultati ottenuti e le conclusioni ritraibili da questa prima valutazione.

2 Modelli di stima dell'ETa

2.1 Approccio *energy balance*: Sen-ET

Le stime Sen-ET sono ottenute sulla base dell'algoritmo Priestley-Taylor T-SEB, distinguendo tra il bilancio energetico a livello del suolo e quello a livello della chioma [7]. Le due superfici vengono individuate utilizzando la frazione di copertura vegetale (Fractional Vegetation Cover, FVC) e caratterizzate mediante la temperatura della superficie del suolo (Land Surface Temperature, LST) [4].

La versione di Sen-ET correntemente utilizzata è riferita alla libreria Python open-source pyTSEB (https://github.com/hectornieto/pyTSEB, ultimo accesso: 20 marzo 2026) che produce dati alla risoluzione spaziale di 20 m per i giorni in cui le immagini termiche del satellite Sentinel-3 sono disponibili.

2.2 Approccio water balance: NDVI-Cws

Il modello NDVI-Cws utilizza un approccio water balance ed è di tipo semi-empirico. In particolare, il metodo stima separatamente la traspirazione dalle superfici verdi e l'evaporazione dal suolo utilizzando il concetto di FVC che viene derivata direttamente dalle immagini NDVI applicando una relazione lineare [5]. L'FVC viene poi combinata con i dati meteorologici giornalieri per considerare gli effetti dello stress idrico a breve termine sulla vegetazione e, seguendo un approccio basato sul concetto di coefficiente colturale (Kc) [8], la stima dell'ETa relativa al giorno *i* si ottiene secondo:

$$ETa_i = ET_{0i} \cdot (Kc_{Veg} \cdot FVC_i \cdot Cws_i + Kc_{Soil} \cdot (1\text{-}FVC_i) \cdot AW_i) \quad (1)$$

dove ET_{0i} viene calcolata con il metodo Jensen & Haise [9], Kc_{Veg} e Kc_{Soil} sono rispettivamente il coefficiente colturale massimo per la vegetazione investigata e quello relativo al suolo (sempre pari a 0.2 nei siti considerati); Cws_i e AW_i sono invece due coefficienti che tengono in considerazione lo stress idrico a breve termine. Quest'ultimo, infatti, non viene rilevato dalle immagini di NDVI, che registrano invece stress prolungati nel tempo, ovvero quelli capaci di causare un impatto intenso e duraturo sulla vegetazione.

Per il calcolo dei due coefficienti meteorologici Cws ed AW si utilizzano dati di precipitazione ed evapotraspirazione potenziale cumulati su periodi variabili a seconda della tipologia di vegetazione considerata (i.e. periodi di integrazione) [10].

3 Materiali e metodi

3.1 Area di studio

La Toscana si estende su una superficie di circa 23.000 km² (9°-12° longitudine Est, 42°-44° latitudine Nord) ed è caratterizzata da una ampia varietà di paesaggi, clima e copertura del suolo. La morfologia della regione varia tra pianure costiere ed ampie valli fluviali, ed aree collinari e montuose che degradano verso la catena appenninica. Il clima varia da mediterraneo, vicino alla costa, a temperato, caldo o freddo, a seconda dell'altitudine, della latitudine e della distanza dal mare.

Le pianure toscane sono occupate principalmente da aree urbane ed attività agricole, mentre le colline e le montagne sono un mosaico di terreni agricoli e foreste. Le colture annuali (principalmente grano, mais ed ortaggi) coprono circa il 25% della regione, mentre le colture arboree come vigneti e uliveti rappresentano circa il 5%. I boschi coprono quasi la metà della superficie della Toscana.

Per il lavoro corrente sono state selezionate tre aree di studio caratterizzate da diversa copertura vegetazionale: un prato-pascolo, una coltura permanente ed una coltura annuale a ciclo invernale (Figura 1, Tabella 1). Tutte le aree selezionate sono situate nell'area metropolitana di Firenze. Durante l'anno di studio (2023), l'ET_0 delle aree è stata di circa 1350 mm mentre la precipitazione, distribuita con massimi primaverile ed autunnale è stata di 750-800 mm.

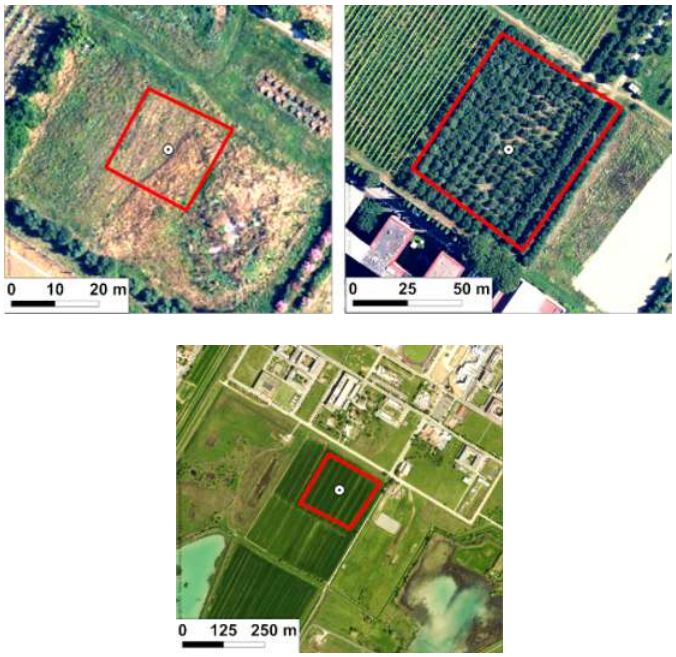


Fig. 1. Ortofoto del 2023 che riportano in alto il prato (sinistra) e l'oliveto (destra) delle Cascine ed in basso il campo di grano di Sesto Fiorentino.

Tabella 1. Posizione e dimensione delle aree di studio selezionate.

Sito	Posizione (°Lat N, °Long E)	Dimensione (ha)	Uso suolo
Cascine 1	43.785,11.218	0.04	Prato-pascolo
Cascine 2	43.786,11.216	0.5	Coltura permanente (oliveto)
Sesto F.no	43.816,11.194	3	Coltura annuale (grano)

3.2 Dati di studio

Per ciascuna delle aree di studio selezionate, per tutto il 2023, sono stati raccolti dati meteorologici giornalieri da stazioni agrometeorologiche locali, includenti anche dati di contenuto idrico del suolo. In aggiunta, per l'oliveto delle Cascine, sono state raccolte misure di sap-flow mediante sensori SFM1 (SFM1 Spa Flow Meter, ICT International Pty Ltd.) applicati a due alberi rappresentativi dell'intero appezzamento; la copertura della chioma (CC) di questi alberi e dell'intero oliveto è stata poi determinata utilizzando un'immagine Google Earth dell'agosto 2023.

Per l'applicazione del modello Sen-ET, le informazioni utilizzate in ingresso sono i dati meteorologici, un modello digitale del terreno (*Shuttle Radar Topography Mission* DEM a 30 m di risoluzione spaziale), una mappa dell'uso del suolo ed i dati telerilevati. In particolare, i dati meteorologici (ovvero temperatura dell'aria, temperatura di

rugiada, pressione, velocità del vento, precipitazioni e radiazione solare) sono ricavati dal dataset ERA-5 prodotto dall'ECMWF a bassa risoluzione spaziale e la mappa di uso del suolo è prodotta dall'ESA nell'ambito della *Climate Change Initiative*. Le informazioni da satellite, come accennato, sono derivate dalle immagini Sentinel-2 (S2) e dalle immagini Sentinel-3 (S3) di temperatura superficiale del suolo. Quest'ultima, che ha una risoluzione spaziale di 1-km, viene ricampionata a 20 m tramite fusione con i dati ottici S2 [4].

Per l'applicazione del modello NDVI-Cws, i dati di temperatura minima e massima e precipitazione sono stati ottenuti interpolando i dati giornalieri di stazioni a terra disponibili presso il Consorzio LaMMA [11]. La radiazione solare è stata invece ottenuta tramite l'algoritmo ERAD, utilizzando immagini Meteosat Second Generation [12]. I dati sono disponibili alla risoluzione spaziale di 250 m e si riferiscono all'anno 2023.

Una mappa di uso suolo della regione in scala 1:10000 è stata prodotta a partire dal CORINE Land Cover le cui classi sono state raggruppate in 6 macro-categorie: foreste, prati-pascoli, colture annuali, colture pluriennali, vivai ed aree urbane.

Per quanto riguarda i dati telerilevati, sono state utilizzate immagini prodotte dal *MultiSpectral Imager* (MSI) montato sui satelliti S2. Tutte le immagini disponibili per il periodo di studio sono state scaricate nel formato L2A; dopo il calcolo dell'NDVI, le immagini sono state composte su 15 giorni e trattate per rimuovere eventuali disturbi atmosferici, come proposto da Maselli et al. [5]. In tal modo si sono ottenute 24 immagini per anno, ad alta risoluzione spaziale (10 m).

3.3 Valori di ETa osservati

Per le colture erbacee (il prato delle Cascine e la coltura annuale di Sesto Fiorentino), l'ETa è stata determinata mediante un approccio simile a quanto proposto da Allen et al. [8], sulla base dei dati raccolti a terra e di informazioni sulla vegetazione desunte dalle immagini GE.

Per l'oliveto delle Cascine, i dati di sap-flow delle due piante campionate sono stati cumulati sul giorno ed estesi all'intero oliveto utilizzando la copertura della chioma dei singoli olivi; successivamente, le misure relative alla sola componente arborea dell'oliveto sono state integrate assumendo un contributo delle specie erbacee direttamente proporzionale alla relativa percentuale di copertura.

3.4 Applicazione e valutazione dei due metodi

A causa della discontinuità temporale delle immagini termiche, le serie prodotte tramite Sen-ET presentano lacune che sono state riempite tramite procedure di "gap filling". L'approccio utilizzato è basato sul calcolo del rapporto tra ETa ed ET_0 per i giorni in cui Sen-ET è disponibile e la sua conseguente applicazione per i giorni mancanti, secondo quanto proposto anche da Guzinski et al. [4].

L'applicazione del modello NDVI-Cws nelle tre aree di studio ha comportato la messa a punto di tre diverse configurazioni per adattarlo alle rispettive tipologie di uso del suolo. In particolare, i Kc_{Veg} utilizzati per il prato, l'oliveto e la coltura annuale sono stati 1, 0.9 ed 1.2, rispettivamente; inoltre, il periodo di integrazione per il calcolo dei

due coefficienti meteorologici Cws ed AW è stato di 30 giorni per le colture erbacee (il prato e la coltura annuale) e di 45 giorni per l'oliveto [13].

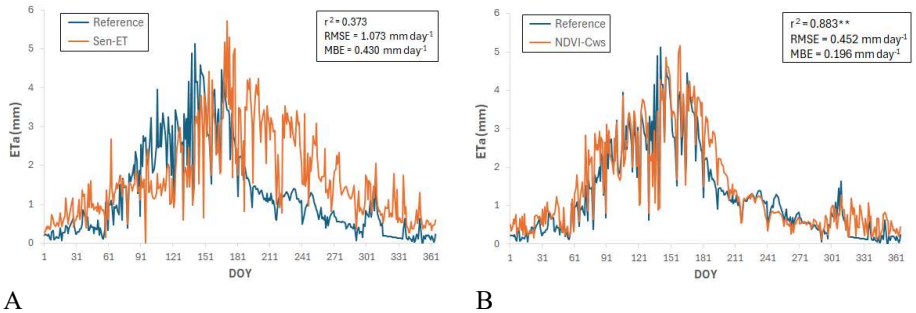
Infine, il confronto tra le osservazioni giornaliere di ETa basate su dati raccolti a terra e quelle stimate da entrambi i modelli è stato effettuato utilizzando le comuni statistiche di accuratezza (i.e. coefficiente di determinazione, r^2, scarto quadratico medio, RMSE, ed errore medio, MBE).

4 Risultati

Le Figure 2-4 mostrano l'andamento dell'ETa giornaliera osservata per le tre aree di studio selezionate insieme alle rispettive stime ottenute dai metodi Sen-ET (A) ed NDVI-Cws (B). In particolare, la Figura 2 è riferita al prato delle Cascine monitorato nel corso del 2023: i valori giornalieri di ETa di riferimento raggiungono massimi intorno a 5 mm giorno^{-1} in tarda primavera, per poi ridursi durante il periodo estivo caldo e siccitoso. Su base annuale il totale osservato è circa 462 mm. Questo andamento è riprodotto con accordo moderato da Sen-ET (r^2 = 0.373) e buono da NDVI-Cws (r^2 = 0.883); inoltre, il primo modello tende a sovrastimare i dati osservati.

In Figura 3(A-B) sono riportati i risultati ottenuti per l'oliveto delle Cascine; su base annua l'ETa misurata è circa 750 mm e l'andamento osservato indica una maggior resilienza allo stress idrico di questo ecosistema rispetto al prato situato nella medesima area. Anche in questo caso le prestazioni del modello Sen-ET sono inferiori rispetto a quelle di NDVI-Cws, sia in termini di andamento temporale (rispettivamente r^2 = 0. 386 e r^2 = 0.821) che di valori assoluti, dal momento che il primo modello evidenzia una forte sottostima concentrata soprattutto nel periodo primaverile.

La Figura 4 mostra l'ETa del campo di grano che nel 2023 assume valori comparabili a quelli del prato delle Cascine (412 mm contro 462 mm). Anche in questo caso, Sen-ET mostra una forte sovrastima soprattutto nel periodo estivo, ovvero quello in cui la copertura vegetale rimasta è maggiormente soggetto a stress idrico maggiore (RMSE = 1.120 mm giorno^{-1}, MBE = 0.482 mm giorno^{-1}). Il modello NDVI-Cws è capace di riprodurre abbastanza fedelmente l'andamento dell'ETa osservata (r^2 = 0.818) e, rispetto alle stime di Sen-ET consente di ottenere una precisione maggiore (RMSE = 0.679 mm giorno^{-1}, MBE = 0.197 mm giorno^{-1}).



A B

Fig. 2. ETa osservata nel 2023 per il prato delle Cascine confrontata con le rispettive stime ottenute da Sen-ET (A) e da NDVI-Cws (B).

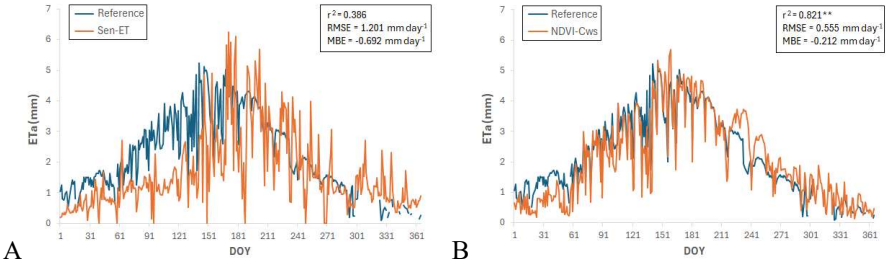


Fig. 3. ETa osservata nel 2023 per l'oliveto delle Cascine confrontata con le rispettive stime ottenute da Sen-ET (A) e da NDVI-Cws (B).

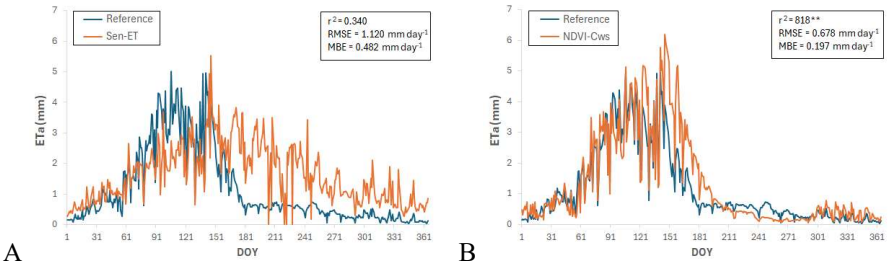


Fig. 4. ETa osservata nel 2023 per il campo di grano di Sesto Fiorentino confrontata con le rispettive stime ottenute da Sen-ET (A) e da NDVI-Cws (B).

5 Discussione e Conclusioni

Il presente studio riporta una prima valutazione di due metodi di stima dell'ETa basati sul telerilevamento, ovvero l'algoritmo Sen-ET, che usa immagini termiche e ottiche, ed il metodo semi-operativo NDVI-Cws che sfrutta invece solo queste ultime.

In particolare, Sen-ET si basa su principi fisici ed è teoricamente capace di stimare i flussi di energia ed acqua che caratterizzano la superficie osservata; per fare ciò, impiega dati termici che, come noto, hanno problemi di sotto-campionamento spazio-temporale [3,4]. Il metodo NDVI-Cws, invece, impiega un approccio semi-empirico basato sul bilancio idrico, che sfrutta la combinazione di dati ancillari ed immagini NDVI che sono disponibili ad una risoluzione spaziale e temporale adatta a seguire la dinamica della vegetazione.

Le stime di ETa dai due metodi sono state valutate verso dati indipendenti dopo aver adottato una tecnica di gap-filling per gli output di Sen-ET. I risultati ottenuti indicano che le stime prodotte da NDVI-Cws sono generalmente più adatte a seguire i processi fisiologici in aree eterogenee e frammentate quali quelle prese in esame nel presente lavoro, sia in termini di intensità che di evoluzione temporale.

Riferimenti bibliografici

1. Liu, Y., Yue, Q., Wang, Q., Yu, J., Zheng, Y., Yao, X., Xu, S.: A framework for actual evapotranspiration assessment and projection based on meteorological, vegetation and hydrological remote sensing products. Remote Sensing 13 (18), 3643 (2021).
2. Zhang, K., Kimball, J.S., Running, S.W.: A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. WIREs Water 3, 834–853 (2016).
3. Guzinski, R., Nieto, H., Sandholt, I., Karamitilios, G.: Modelling high-resolution actual evapotranspiration through Sentinel-2 and Sentinel-3 data fusion. Remote Sensing 12 (9), 1433 (2020).
4. Guzinski, R., Nieto, H., Ramo Sánchez, R., Sánchez, J.M., Jomaa, I., Zitouna-Chebbi, R., Roupsard, O., López-Urrea, R.: Improving field-scale crop actual evapotranspiration monitoring with Sentinel-3, Sentinel-2, and Landsat data fusion. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation 125, 103587 (2023).
5. Maselli, F., Papale, D., Chiesi, M., Matteucci, G., Angeli, L., Raschi, A., Seufert, G.: Operational monitoring of daily evapotranspiration by the combination of MODIS NDVI and ground meteorological data: Application and evaluation in Central Italy. Remote Sensing of Environment 152, 279–290 (2014).
6. Melton, F.S., Huntington, J., Grimm, R., Herring, J., Hall, M., Rollison, D., Erickson, T., Allen, R., Anderson, M., Fisher, J.B. et al.: OpenET: Filling a critical data gap in water management for the Western United States. Journal of the American Water Resources Association 58, 971–994 (2022).
7. Kustas, W.P, Norman, J.M.: Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. Agricultural and Forest Meteorology 94, 13–29 (1999).
8. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M.: Crop evapotranspiration — Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, ISBN 92-5-104219-5 (1998).
9. Jensen, M.E., Heise, H.R.: Estimating evapotranspiration from solar radiation. Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE 89, 15-41 (1963).
10. Maselli, F., Papale, D., Puletti, N., Chirici, G., Corona, P.: Combining remote sensing and ancillary data to monitor the gross productivity of water-limited forest ecosystems. Remote Sensing of Environment 113, 657–667 (2009).
11. Fibbi, L., Bartolini, G., Gozzini, B., Grifoni D.: Spatial interpolation of meteorological variables with Daymet4-r2: A self-calibrating algorithm for complex terrains. Water 18(12), 1461 (2026).
12. Fibbi, L., Maselli, F., Pieri, M.: Improved estimation of global solar radiation over rugged terrains by the disaggregation of Satellite Applications Facility on Land Surface Analysis data (LSA SAF). Meteorological Applications 27, e1940 (2020).
13. Maselli, F., Arriga, N., Battista, P., Brilli, L., Chiesi, M., Dell'Acqua, A., Dionigi, M., Gardin, L., Gioli, B., Massari, C., Moriondo, M., Pieri, M., Putzolu, S, Rapi, B., Todisco, F., Fibbi, L.: High spatio-temporal resolution estimation of actual evapotranspiration by the use of Sentinel-2 MSI data. International Journal of Applied Earth Information and Geoinformation, in revision (2026).