

MONITORAGGIO DEGLI INVASI E UTILIZZO DEI DATI SATELLITARI

IL MONITORAGGIO DELLA DISPONIBILITÀ DI ACQUA È DI IMPORTANZA FONDAMENTALE PER LA GESTIONE DELLE CRISI IDRICHE. IL DIPARTIMENTO DELLA PROTEZIONE CIVILE STA SPERIMENTANDO ALCUNE TECNICHE INNOVATIVE SUI CORPI IDRICI SUPERFICIALI. L'UTILIZZO DEI DATI SATELLITARI PRESENTA RILEVANTI VANTAGGI A SUPPORTO DELLE DECISIONI OPERATIVE.

Negli ultimi venticinque anni il territorio nazionale è stato interessato, con crescente frequenza, da numerose siccità che, in molti casi, hanno determinato vere e proprie crisi idriche e la consistente riduzione dell'acqua disponibile per i differenti comparti d'uso (idropotabile, irriguo, idroelettrico, industriale ecc.). La siccità è un fenomeno naturale relativamente lento rispetto ad altri (terremoti, eruzioni vulcaniche, frane, inondazioni ecc.), ma ostacola significativamente l'ordinato sviluppo sociale ed economico di un territorio, come testimoniato dai disagi sofferti dalle popolazioni interessate o dalla difficoltà delle imprese agricole a disporre dell'acqua necessaria per i turni di irrigazione previsti.

Nell'ambito delle competenze del Servizio nazionale della protezione civile rientra la previsione, prevenzione e il

contrasto del deficit idrico, ricompreso all'art. 16 comma 1 del Dlgs 1/2018 (codice di protezione civile) tra le tipologie di rischio in ordine alle quali si esplica l'azione di protezione civile. In particolare, le attività del Servizio nazionale della protezione civile si focalizzano sul settore idropotabile. Il monitoraggio della disponibilità idrica è di importanza fondamentale ai fini del preannuncio delle crisi idriche: infatti, prevedere con sufficiente anticipo l'approssimarsi di condizioni di scarsità idrica consente agli enti responsabili della programmazione e della gestione delle risorse idriche di adottare alcune misure gestionali finalizzate a prolungare la durata delle riserve disponibili, nonché a limitare i disagi per la popolazione e le ripercussioni per i differenti comparti produttivi.

Oltre alle metodologie tradizionali di monitoraggio della disponibilità idrica, il Dipartimento della protezione

civile (Dpc) sta promuovendo la sperimentazione di alcune tecniche innovative: in tale contesto, su indicazione dello stesso, Fondazione Cima (Centro internazionale in monitoraggio ambientale) – centro di competenza del Dpc stesso – sta conducendo lo sviluppo e la sperimentazione di un servizio operativo di monitoraggio dei corpi idrici superficiali (ad esempio invasi artificiali) basato sull'analisi di dati satellitari. Il servizio in questione consente di monitorare la variazione dell'estensione della superficie dei suddetti corpi d'acqua (*water bodies*, Wb) con una frequenza compatibile con le finalità di protezione civile. Il suddetto connubio scientifico-operativo ha permesso di ottimizzare il sistema verso scopi di protezione civile, di fatto implementando una strategia di co-design nella quale i requisiti operativi indicati dal Dpc sono stati utilizzati per effettuare le scelte tecniche di sviluppo del sistema in questione. L'obiettivo finale è supportare



FOTO: DI MATHÉLA - WIKIMÉDIA - PUBBLICO DOMINIO

le decisioni degli attori, istituzionali e non istituzionali, responsabili della gestione delle risorse idriche.

Di seguito verrà brevemente descritta la metodologia alla base di tale servizio e successivamente verranno fatte alcune considerazioni in merito alle ricadute operative di tale sperimentazione, ai suoi pregi e limiti d'impiego, alle informazioni utili che è possibile estrarre anche per finalità di programmazione delle risorse idriche: da ultimo, verranno sinteticamente tracciate le direttrici dei possibili sviluppi futuri.

Il monitoraggio satellitare dei corpi idrici superficiali

Il servizio in questione si basa su immagini fornite da sensori di telerilevamento installati a bordo di satelliti. L'osservazione satellitare consente di monitorare su scala sinottica (ovvero su ampie porzioni di territorio, fino all'intera scala nazionale) le variazioni temporali delle superfici osservate, come l'estensione dei corpi idrici, la copertura del suolo e altri indicatori ambientali. Tali dati risultano particolarmente utili per valutare la disponibilità delle risorse idriche, attraverso l'analisi delle variazioni spazio-temporali dell'estensione dei Wb. Nel servizio proposto, queste variazioni vengono espresse come percentuale rispetto all'estensione storica massima della superficie del bacino considerato (% Extent). Le immagini satellitari, acquisite in diverse bande dello spettro

elettromagnetico, sono caratterizzate da proprietà fondamentali quali la risoluzione spaziale (ossia la minima distanza tra due oggetti distinguibili) e la risoluzione temporale (intervallo tra due acquisizioni che coincide con il tempo di rivisita se si considera la stessa geometria di osservazione).

Per rispettare i requisiti di dettaglio spazio-temporale richiesti dal Dpc, sono stati utilizzati i dati ottici ad alta risoluzione spaziale forniti dalla costellazione Sentinel-2 (S2) del programma europeo Copernicus. Nelle frequenze ottiche, i sensori misurano la frazione della radiazione solare riflessa dalla superficie terrestre verso il satellite in bande che vanno dal visibile (lunghezze d'onda di circa 0,4-0,7 μm) al vicino infrarosso (*near infrared*, Nir: ca. 0,7-1,3 μm) e all'infrarosso a onde corte (*short-wave infrared*, Swir: ca. 1,3-2,5 μm). La configurazione a due satelliti garantisce una frequenza di rivisita di 5 giorni, permettendo un monitoraggio regolare e aggiornato. Le immagini sono acquisite con una risoluzione spaziale di 10-20 metri nelle bande spettrali utilizzate per la mappatura dei corpi idrici. In particolare, l'acqua presenta alti coefficienti di assorbimento nelle bande del Nir e dello Swir, rendendo queste regioni spettrali particolarmente utili per monitorarne la presenza e il contenuto.

La disponibilità dei dati ottici può essere limitata dalla presenza di copertura nuvolosa, e per questo motivo il servizio può subire delle limitazioni dovute all'assenza di dati utili. Per superare questo vincolo, è in fase di

sviluppo un modulo aggiuntivo basato sull'elaborazione di dati a microonde acquisiti da sensori radar ad apertura sintetica (*synthetic aperture radar*, Sar), che sono sensori attivi, ovvero capaci di emettere un proprio segnale e di riceverne la frazione retrodiffusa dalla superficie terrestre. Le acquisizioni nella banda delle microonde (lunghezze d'onda comprese tra 30 e 3 cm) sono indipendenti dalla presenza di nubi e dall'illuminazione solare. L'obiettivo di questo ulteriore sviluppo è integrare informazioni provenienti da sensori differenti, al fine di garantire l'operatività del servizio anche in una più ampia casistica di condizioni ambientali. Per tale finalità, è stato progettato un modulo per il processamento dei dati Sar provenienti dalla costellazione Copernicus Sentinel-1 (risoluzione temporale: 6 giorni per immagini acquisite con la stessa orbita; risoluzione spaziale: circa 20 m) e dalla costellazione Cosmo-SkyMed (Csk). Questi ultimi, acquisiti nell'ambito del programma MapItaly, sono resi disponibili dall'Agenzia spaziale italiana (Asi) in collaborazione con Cima e Dpc e presentano una risoluzione spaziale di circa 5 m. Il programma MapItaly prevede un monitoraggio satellitare dell'intero territorio nazionale ogni 16 giorni.

L'identificazione della presenza di acqua tramite dati Sar si basa sulla sensibilità del sensore alla rugosità superficiale: superfici lisce, come l'acqua calma, riflettono il segnale radar in direzione speculare, risultando quindi scure nelle immagini, mentre superfici

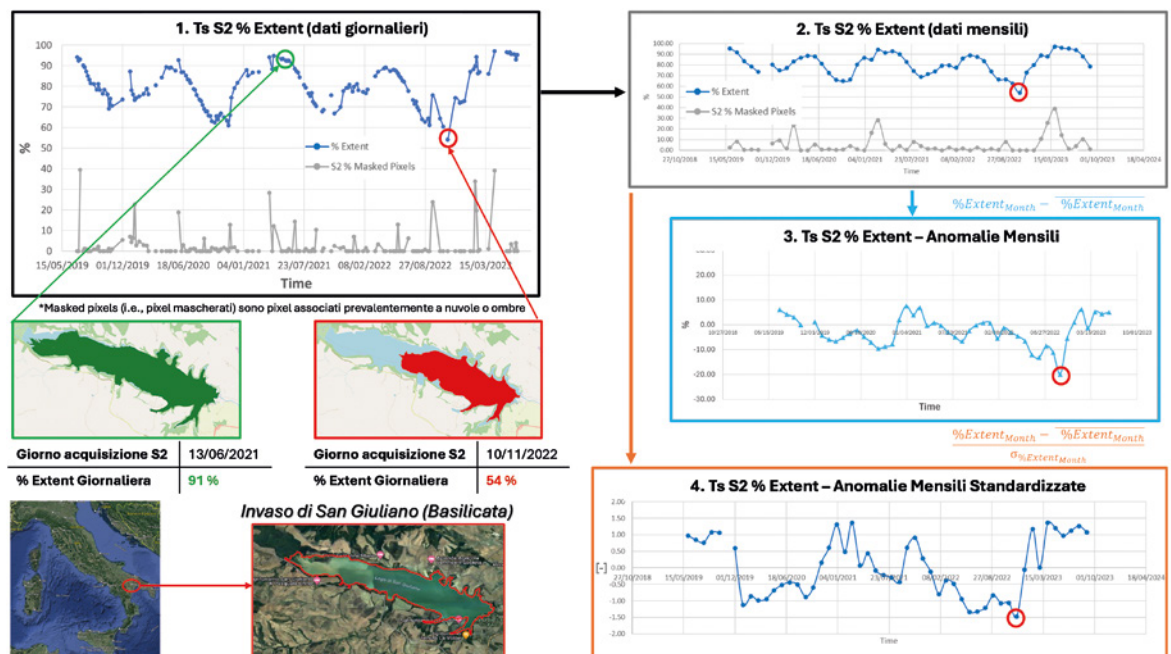


FIG. 1
SERVIZIO
SATELLITARE

Workflow del servizio satellitare: dalla generazione delle serie temporali giornaliere di % Extent, alla produzione di serie mensili, anomalie mensili e anomalie standardizzate. Gli esempi riguardano l'invaso di San Giuliano (Basilicata).

più rugose (ad esempio suoli nudi) o vegetate producono una maggiore retrodiffusione del segnale verso il radar, apparendo quindi più luminose. Tuttavia, anche la mappatura dell'acqua da Sar presenta alcune criticità. In presenza di vento, la rugosità della superficie d'acqua aumenta, incrementando la retrodiffusione e riducendo il contrasto tra acqua e aree circostanti. Inoltre, a causa della geometria di acquisizione del Sar, le immagini sono soggette, in aree a orografia complessa, a distorsioni prospettiche che ne limitano l'utilizzo. Al momento, lo sviluppo del servizio basato sul processamento dei dati ottici S2 è da considerarsi in fase pre-operativa, ovvero tecnicamente pronto all'operatività, ma ancora in fase di validazione su differenti aree di studio. Parallelamente, lo sviluppo del processore dedicato ai dati Sar è attualmente in fase di design e test. Una volta completato questo modulo, verrà avviato lo sviluppo del componente per l'integrazione tra dati ottici e Sar. La variabile principale di output del sistema, ovvero la *% Extent*, è prodotta in formato di serie temporale (*time series*, Ts) con cadenza giornaliera, ossia riferita al giorno dell'acquisizione satellitare, e mensile, ottenuta aggregando i valori giornalieri del mese (cioè calcolandone la mediana). Il servizio è stato concepito per operare in tempo quasi reale (*near real time*, Nrt): una volta definita l'area di interesse e processati i dati storici disponibili, i nuovi dati satellitari vengono elaborati non appena resi disponibili dal *data provider*. Considerando che l'obiettivo è fornire informazioni utili per la pianificazione e l'intervento anche in situazioni di emergenza, il sistema prevede anche la produzione di serie temporali relative alle anomalie mensili della *% Extent*. Tali anomalie rappresentano la differenza tra le condizioni di un mese e la media di riferimento per lo stesso mese (calcolata in un dato intervallo temporale di

riferimento pluriennale). Le anomalie vengono calcolate sia come semplice differenza tra valori di *% Extent*, sia in modalità standardizzata, ovvero normalizzate rispetto alla deviazione standard. Questo approccio consente di ottenere indicatori con significato statistico ben definito, utili per il confronto con anomalie di altre variabili ambientali, come ad esempio lo stato della vegetazione, che può risultare critico in periodi siccitosi.

Un'immagine descrittiva della modalità di funzionamento del servizio è riportata in *figura 1*, mentre la metodologia è illustrata in dettaglio in Cenci et al. (2024), che presenta anche i risultati di una prima validazione del servizio condotta sull'invaso di San Giuliano (Basilicata). La validazione si basa sul confronto tra le variabili del servizio derivate da dati S2 e variabili analoghe ottenute da dati in situ relative al volume d'acqua invaso (definite, per

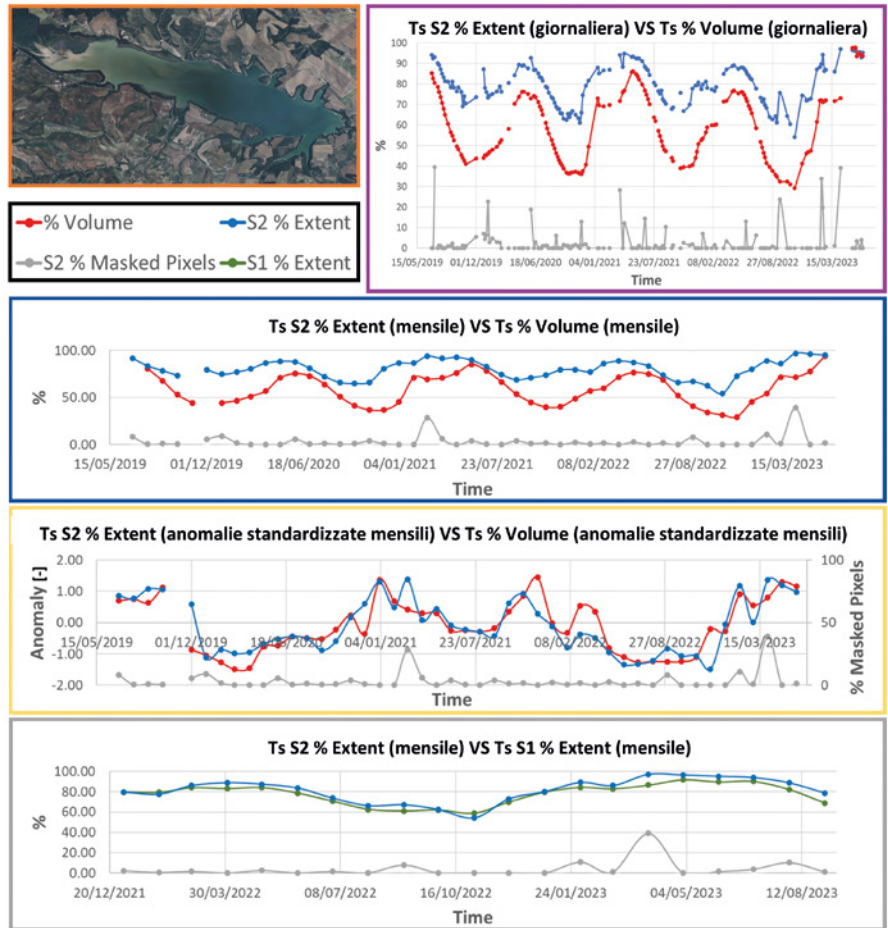


FIG. 2 SERIE TEMPORALI
Risultati delle analisi nell'area di San Giuliano (box arancione). Il confronto tra *% Extent* e *% Volume* è mostrato per Ts giornalieri (box viola), mensili (box blu) e anomalie mensili standardizzate (box giallo). Il box grigio riporta i risultati della cross-validazione (confronto tra Ts mensili di *% Extent* derivate da dati S2 e S1). La legenda è riportata nel box nero.

Fonte: La figura è stata adattata da Cenci et al., 2024.

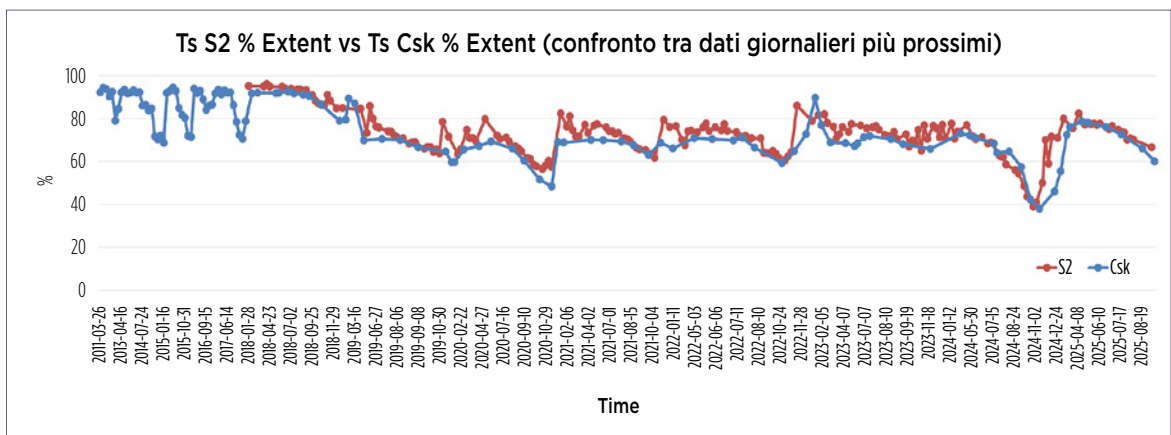


FIG. 3
CROSS-VALIDAZIONE

Risultati della cross-validazione (confronto con dati derivati da acquisizioni Csk) del servizio eseguita nell'area di studio dell'invaso del Camastra.

analogia, % *Volume*). L'obiettivo è valutare le prestazioni del servizio mediante metriche statistiche, quali:

- coefficiente di correlazione di Pearson (ρ): misura l'accordo tra le varie Ts
- differenza media (μDiff): utile per individuare eventuali bias sistematici, attribuibili all'impatto della batimetria nel confronto tra dati volumetrici e areali
- deviazione standard della differenza (σDiff): quantifica errori casuali, ad esempio associabili a nubi non mascherate o artefatti radiometrici
- errore quadratico medio (*root mean squared error*, Rmse): stima congiunta di μDiff e σDiff .

I risultati mostrano che le Ts giornaliere e mensili di % *Extent* sono fortemente correlate con quelle volumetriche ($\rho \geq 0,93$), dimostrando la capacità del servizio di identificare e monitorare correttamente i trend di riempimento e svuotamento del lago. La presenza di bias sistematici risulta fortemente dipendente dalle caratteristiche geomorfologiche/batimetriche dell'invaso, variando quindi per ogni Wb. Ne consegue che la percentuale di riempimento stimata da dati volumetrici e superficiali può presentare differenze significative. Nelle condizioni più problematiche (ovvero in presenza di sponde molto acclivi) il bias può rendere difficile identificare con chiarezza i periodi critici (quelli associati a condizioni siccitose e di scarsità idrica). L'utilizzo delle anomalie di % *Extent* riduce l'impatto della presenza e variabilità del bias e consente di individuare con maggiore accuratezza le situazioni di siccità o di stress idrico (riducendo l'Rmse).

Queste capacità del servizio sono state confermate anche da una successiva validazione eseguita (con modalità analoghe) su scala regionale, in Sardegna, tenendo in considerazione un numero maggiore di invasi (14) che sono stati monitorati per un periodo temporale maggiore: 8 anni, dal 2017 al 2024 (Cenci et al., 2025).

L'analisi delle performance del servizio evidenzia che, nell'interpretazione dei risultati, non va sottovalutato il contributo antropico. Per esempio, Wb caratterizzati da elevata variabilità spazio-temporale dei volumi d'acqua (come quelli a uso prevalentemente idroelettrico) possono mostrare trend meno correlati con quelli satellitari, poiché la risoluzione temporale del sensore può non essere sufficiente a cogliere pienamente tali dinamiche. Inoltre, manovre antropiche relative alle

risorse idriche (ad esempio svuotamento per manutenzione) possono complicare l'interpretazione dei risultati (ad esempio essere confuse con condizioni di siccità). Per valutazioni relative alle dinamiche ambientali, è quindi utile valutare la relazione tra le Ts di dati di % *Extent* (incluse le anomalie) e altre variabili, come indici satellitari relativi allo stato della vegetazione. Alcune ricerche preliminari in questo contesto hanno mostrato le potenzialità del servizio anche per questo tipo di applicazioni (Parshina et al., 2024).

Ulteriori analisi sono state condotte per confrontare l'andamento delle Ts mensili di % *Extent* ottenute dal processamento dei dati satellitari di diversa natura: ottici (S2) e Sar (S1, Csk). Questi ultimi sono stati opportunamente elaborati dal processore dei dati Sar in via di sviluppo all'interno del servizio qui presentato. Il confronto tra S2 e S1 (*figura 2*) è stato effettuato sull'invaso di San Giuliano, mentre quello tra S2 e Csk (*figura 3*) sull'invaso del Camastra (Basilicata). Gli esiti delle analisi comparative, valutati utilizzando le metriche già descritte, hanno mostrato un forte accordo tra le Ts ($\rho_{S2-S1} = 0,96$, $\rho_{S2-CSK} = 0,88$) e l'assenza di errori sistematici significativi. Questi risultati mostrano che dati di diversa natura, se opportunamente processati e integrati, possono fornire informazioni compatibili per generare Ts più fitte, e quindi stime di % *Extent* più robuste e affidabili. Analisi successive saranno dedicate a definire la migliore strategia di integrazione di questi dati.

Conclusioni

La sperimentazione ha dimostrato la fattibilità operativa del servizio satellitare per il monitoraggio dei Wb, evidenziando la capacità di generare indicatori

(% *Extent* e anomalie) utili per supportare la gestione delle risorse idriche. I risultati ottenuti hanno mostrato un'elevata correlazione tra le stime satellitari e i dati *in situ*, sebbene batimetria e dinamiche antropiche rappresentino fonti di incertezza. L'integrazione di dati ottici e Sar, attualmente in fase di sviluppo, rappresenta un passo fondamentale per garantire continuità operativa anche in condizioni di copertura nuvolosa e per migliorare la robustezza delle stime. In linea generale, l'utilizzo dei dati satellitari per il monitoraggio dei corpi idrici presenta numerosi e rilevanti vantaggi: in primo luogo, consente di monitorare aree vaste con una frequenza di aggiornamento generalmente adeguata alle finalità di gestione delle risorse idriche e di prevenzione delle crisi a fini di protezione civile. Inoltre, garantisce la disponibilità di dati coerenti nel tempo e nello spazio, permettendo di individuare trend significativi e di fornire agli operatori indicazioni tempestive sull'approssimarsi di condizioni di scarsità idrica. Infine, consente di ottenere informazioni preziose in contesti territoriali caratterizzati da pochi dati strumentali (*data-scarce environments*), come avviene in molte ed estese aree del pianeta.

L'integrazione dei dati satellitari nella gestione delle risorse idriche può fornire un utile contributo a sistemi di monitoraggio tempestivi e affidabili, capaci di supportare decisioni operative e garantire una gestione sostenibile delle risorse in scenari complessi e mutevoli.

Andrea Duro¹, Silvia Puca¹, Luca Cenci², Giuseppe Squicciarino², Edoardo Cremonese², Luca Pulvirenti²

1. Presidenza del Consiglio dei ministri, Dipartimento della Protezione Civile
2. Fondazione Cima

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Cenci L., Squicciarino G., Pulvirenti L., Puca S., Duro A., 2024, "Validation of a prototype monitoring system of water bodies extent for civil protection applications", *Igarss 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Athens, Greece, 2024, pp. 3765-3769. doi: 10.1109/IGARSS53475.2024.10641198.

Cenci L., Squicciarino G., Cremonese E., Pulvirenti L., Pintus M.T., Botti P., Azzena C., Fadda G., Duro A., Puca S., 2025, "Presenting of an EO-based service for hydrological drought monitoring", *Esa Living Planet Symposium (Lps)*, 23-27 June 2025, Vienna, Austria, <https://bit.ly/Cenci-et-al-2025>

Parshina O., Cenci L., Squicciarino G., Pulvirenti L., 2024, "Satellite-based monitoring of vegetation health and water bodies extent in dry periods and under drought conditions", in *Igarss 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Athens, Greece, 2024, pp. 4027-4031. doi: 10.1109/IGARSS53475.2024.10640789.