

UNIVERSITÀ  
CATTOLICA  
del Sacro Cuore

## Relazione tecnico-scientifica sul piano di monitoraggio di un impianto agrivoltaico sito nei Comuni di Montechiarugolo e Traversetolo (PR)

### Responsabile scientifico

Prof. Stefano Amaducci

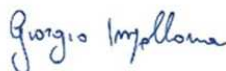


Professore Ordinario di Coltivazione Erbacee, Università Cattolica del Sacro Cuore

Responsabile del piano di monitoraggio agronomico, Tspin S.r.l. (spin-off dell'Università Cattolica del Sacro Cuore)

### Responsabile tecnico

Dott. Agr. Giorgio Impollonia, PhD



Assegnista di ricerca, Università Cattolica del Sacro Cuore

Coordinamento tecnico e gestione del sistema di monitoraggio, Tspin S.r.l. (spin-off dell'Università Cattolica del Sacro Cuore)



CORRADO  
PLUCHINO  
27.02.2026 14:56:24  
GMT+01:00

# Indice

1	Premessa	3
2	Il monitoraggio dei sistemi agrivoltaici	4
3	Piano di monitoraggio del sistema agrivoltaico	6
3.1	Monitoraggio attività agricola e risparmio idrico	7
3.2	Monitoraggio del suolo e del microclima	9
3.3	Protocollo di trasmissione e piattaforma di analisi dei dati	12
3.4	Proposta economica del piano di monitoraggio	17
4	Bibliografia	19

# 1 Premessa

La società Green Frogs S.r.l. ha commissionato alla società Tspin S.r.l., spin-off dell'Università Cattolica del Sacro Cuore, la redazione di uno studio tecnico-scientifico finalizzato alla realizzazione di un piano di monitoraggio per il sistema agrivoltaico (AV) ubicato nei Comuni di Montechiarugolo e di Traversetolo, in Provincia di Parma.

Tale piano si inserisce nel più ampio contesto delle politiche nazionali per la transizione ecologica e per la promozione delle energie rinnovabili, con particolare riferimento al Decreto Ministeriale “Agrivoltaico” e alle relative Regole Operative pubblicate dal Gestore dei Servizi Energetici (GSE). Queste ultime stabiliscono, tra gli altri requisiti, l’obbligo di sviluppare sistemi di monitoraggio che consentano di valutare l’effettiva integrazione tra produzione energetica e mantenimento della produttività agricola, nonché gli eventuali benefici in termini di efficienza idrica, microclima e fertilità del suolo.

La relazione è strutturata in due sezioni principali:

- i) una prima parte introduttiva, che propone un inquadramento generale del tema agrivoltaico, con particolare attenzione agli approcci di monitoraggio adottati nei principali studi scientifici e nei progetti pilota a livello nazionale e internazionale. Vengono inoltre delineate le potenzialità e le sfide legate all’integrazione tra attività agricola e impianto fotovoltaico;
- ii) una seconda parte, in cui viene presentato un piano di monitoraggio avanzato, sviluppato sulla base dell’expertise maturata da Tspin S.r.l. all’interno delle attività di ricerca dell’Università Cattolica del Sacro Cuore nei settori dell’agricoltura di precisione, della modellistica colturale e dei sistemi di monitoraggio ambientale. Il piano proposto prevede una combinazione di tecniche di monitoraggio diretto e indiretto, sensoristica avanzata, modellazione agrometeorologica e analisi in campo, con l’obiettivo di fornire dati affidabili e validati su aspetti agronomici e microclimatici.

L’approccio adottato è coerente con le indicazioni del GSE e si avvale di tecnologie a basso impatto energetico (LPWAN - Sigfox e LoRa), integrate con una piattaforma cloud per l’analisi e la visualizzazione dei dati in tempo reale. I risultati attesi contribuiranno alla valutazione della sostenibilità tecnico-agronomica dell’impianto AV, garantendo al contempo trasparenza, replicabilità e conformità con gli standard richiesti.

## 2 Il monitoraggio dei sistemi agrivoltaici

Il mantenimento della produttività agricola in un impianto AV è un requisito fondamentale stabilito dalle normative internazionali. Paesi come Francia, Germania, Giappone e Corea del Sud hanno imposto limiti alla riduzione delle rese agricole in tali impianti: rispettivamente il 100%, 66%, 80% e 80% della produttività rispetto alla piena luce (Dupraz, 2023). In Italia, non esiste un limite normativo preciso, ma il DM Agrivoltaico prevede che la riduzione della produzione lorda vendibile (PLV) non superi il 30% per mantenere i sussidi destinati ai sistemi AV avanzati. In Italia, dunque, la regolamentazione prevede che il mantenimento delle rese agricole sia inserita nei programmi di monitoraggio. Le aziende agricole devono dimostrare il mantenimento delle colture e la continuità della produzione agricola, verificando che la resa non scenda sotto il 70% della PLV di riferimento. Oltre a questo, le linee guida prevedono il controllo di parametri microclimatici e biologici, come l'efficienza d'uso dell'acqua e la fertilità del suolo, per valutare l'impatto positivo degli impianti AV. Secondo le linee guida in materia di impianti agrivoltaici, l'attività di monitoraggio è essenziale per garantire il rispetto dei parametri fondamentali dell'AV per tutta la durata dell'impianto. Oltre alla verifica della continuità dell'attività agricola, il monitoraggio consente di valutare l'efficacia delle misure di promozione degli impianti agrivoltaici innovativi previste dal PNRR.

A tal fine, il DL 77/2021 stabilisce l'obbligo di installare un sistema di monitoraggio per accedere agli incentivi statali, con particolare attenzione a due macroaree di analisi:

- Monitoraggio principale (REQUISITO D), che riguarda la continuità dell'attività agricola e il risparmio idrico. Questo include la valutazione dell'impatto sulle colture, la produttività agricola delle diverse tipologie di colture o allevamenti e la stabilità operativa delle aziende agricole coinvolte.
- Monitoraggio secondario (REQUISITO E), finalizzato a misurare parametri aggiuntivi come il recupero della fertilità del suolo, il microclima e la resilienza ai cambiamenti climatici.

Secondo le regole operative pubblicate dal GSE nel 2024 per l'attuazione del DM Agrivoltaico, il monitoraggio prevede l'adozione di sistemi all'interno degli impianti agrivoltaici (AV), volti a verificare l'impatto dell'installazione fotovoltaica sulle colture, la produttività agricola per le diverse tipologie di coltivazioni e la continuità delle attività delle aziende agricole coinvolte. Il monitoraggio della continuità delle attività agricole e pastorali rappresenta il requisito fondamentale per accedere e mantenere gli incentivi durante l'intera vita utile degli impianti, ed è indicato come "monitoraggio principale". La rilevazione di ulteriori parametri previsti dal DM Agrivoltaico, come il risparmio idrico, il recupero della fertilità del suolo, il microclima e la resilienza ai cambiamenti climatici, rappresenta un insieme di dati di supporto, utile per effettuare valutazioni aggiuntive qualora i valori rilevati dal monitoraggio principale risultino non conformi alle aspettative. Questi sistemi vengono indicati come "monitoraggio secondario". Per la verifica della continuità dell'attività agricola, il GSE richiede di confrontare la Produzione Lorda Vendibile (PLV) triennale media della produzione AV con una PLV di riferimento, calcolata utilizzando i dati presenti nella banca dati RICA o, esclusivamente per le iniziative che accedono tramite Registri, nel fascicolo aziendale. Secondo il piano operativo attuale del DM Agrivoltaico, la PLV dell'attività AV non deve essere inferiore di oltre il 30% rispetto alla PLV di riferimento.

Il monitoraggio della continuità delle attività agricole e pastorali deve essere documentato attraverso una relazione agronomica, che si basa sulle informazioni contenute nei fascicoli aziendali e deve essere integrata con il benchmarking degli indicatori economici e tecnici forniti dalla banca dati RICA. Questa relazione ha il compito di attestare la conformità dell'attività agricola ai requisiti richiesti, garantendo il rispetto delle condizioni necessarie per il mantenimento degli incentivi.

### 3 Piano di monitoraggio del sistema agrivoltaico

Il piano di monitoraggio proposto si articola in una strategia integrata che comprende la rilevazione sistematica dell'attività agricola, la valutazione dell'efficienza d'uso della risorsa idrica e l'analisi dettagliata delle condizioni microclimatiche generate dalla presenza del sistema agrivoltaico. Sebbene l'area oggetto di intervento sia già storicamente destinata alla coltivazione agricola e gestita in regime asciutto (non irriguo), si ritiene strategico, in ottica sperimentale, implementare un sistema avanzato di rilevazione dell'umidità e della fertilità del suolo. Tale approccio è finalizzato a indagare in modo approfondito le modificazioni delle dinamiche pedoclimatiche e agronomiche derivanti dalla coesistenza tra colture e impianto fotovoltaico sopraelevato.

A tal fine, è prevista l'installazione di sensoristica in situ per il monitoraggio continuo di variabili chiave. Tra queste, l'umidità del suolo sarà monitorata mediante sonde in grado di rilevare il potenziale idrico, indicatore del contenuto d'acqua disponibile per le piante. I dati ottenuti consentiranno di analizzare le fluttuazioni dell'umidità del terreno in relazione agli eventi meteorici, all'ombreggiamento prodotto dai moduli fotovoltaici e al tipo di copertura vegetale presente, anche in assenza di irrigazione. Parallelamente, saranno effettuati campionamenti periodici di suolo al fine di valutare eventuali variazioni nei principali indicatori di fertilità chimico-fisica, con l'obiettivo di comprendere se e in che misura l'ombreggiamento e la minore evapotraspirazione influenzino i processi biogeochimici del suolo.

Un ulteriore aspetto centrale del piano di monitoraggio è rappresentato dal monitoraggio microclimatico, che verrà realizzato attraverso l'installazione di stazioni agrometeorologiche equipaggiate con sensori specifici per la misurazione di: temperatura dell'aria e del suolo, umidità relativa dell'aria, velocità e direzione del vento, e radiazione solare globale. La raccolta dei dati sarà effettuata sia in pieno campo (area non coperta dai moduli) che in prossimità del retro-modulo (zona ombreggiata), in modo da consentire un confronto diretto tra condizioni microclimatiche differenti e valutarne gli effetti sull'ambiente agricolo e sulle colture.

La riduzione della radiazione solare diretta in corrispondenza delle aree ombreggiate, indotta dalla presenza dei pannelli, ha infatti un impatto diretto sulla resa (Amaducci et al., 2018) e sulla dinamica dell'evapotraspirazione. Numerosi studi (Barron-Gafford et al., 2019; Elamri et al., 2018; Sturchio et al., 2024) hanno evidenziato come l'ombreggiamento possa portare a una significativa riduzione della richiesta evapotraspirativa, determinando una maggiore efficienza nell'uso dell'acqua da parte delle piante (Bellone et al., 2024) e contribuendo, in condizioni pedoclimatiche limitanti, alla mitigazione dello stress idrico.

Il sistema di monitoraggio progettato si configura, dunque, non solo come uno strumento di verifica del rispetto dei criteri tecnico-agronomici imposti dalla normativa, ma anche come un'opportunità conoscitiva per acquisire dati scientificamente validati sul funzionamento e sull'impatto del sistema AV. I dati raccolti alimenteranno un database utile sia per fini di reportistica tecnica, sia per analisi comparative e modellistiche volte a valutare la sostenibilità, la replicabilità e il potenziale di ottimizzazione dell'interazione tra produzione energetica e produzione agricola.

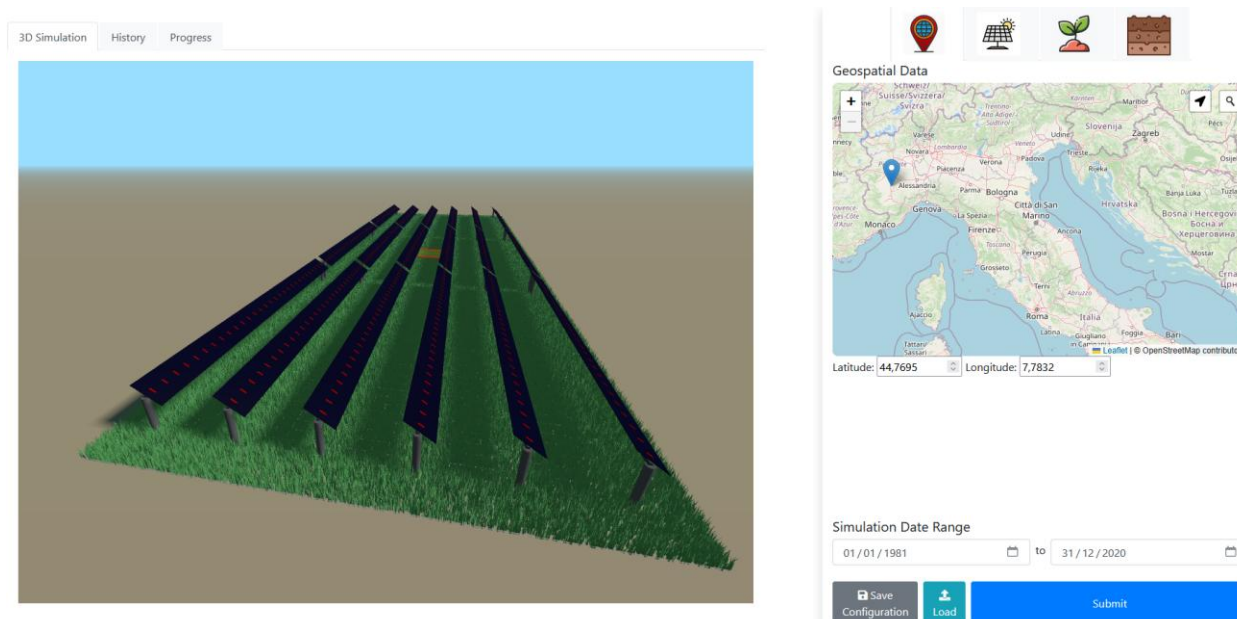
### 3.1 Monitoraggio attività agricola e risparmio idrico

Il monitoraggio dell'attività agricola e del risparmio idrico verrà implementato attraverso un approccio integrato che combina modellistica culturale, sensoristica di prossimità e verifiche dirette in campo, condotte da personale tecnico e agronomico specializzato. Le simulazioni agronomiche saranno eseguite utilizzando una piattaforma (Figura 1) che integra un modello radiativo per simulare la distribuzione della radiazione solare sotto i pannelli fotovoltaici e un modello culturale per la stima della resa e del bilancio idrico.

I dati acquisiti dai sensori installati per il monitoraggio delle condizioni del suolo e del microclima consentiranno di simulare con precisione l'evoluzione della coltura, tenendo conto di parametri gestionali fondamentali, quali l'epoca di semina, le operazioni di lavorazione del suolo, le fertilizzazioni e altri interventi agronomici. La piattaforma di simulazione permette un confronto tra le rese ottenute in piena luce e quelle in condizioni agrivoltaiche, con l'obiettivo di quantificare eventuali riduzioni del Prodotto Lordo Vendibile (PLV), come richiesto dalle normative del GSE.

L'insieme di queste fasi, unito al monitoraggio continuo delle condizioni del suolo e del microclima, e al calcolo del PLV, sia tramite la banca dati RICA che utilizzando la resa simulata dal modello di simulazione come benchmark, permetterà di redigere la relazione agronomica da fornire al GSE. Questo approccio integrato fornirà una visione completa dell'efficienza agronomica del sistema e garantirà il rispetto delle normative previste dal GSE.

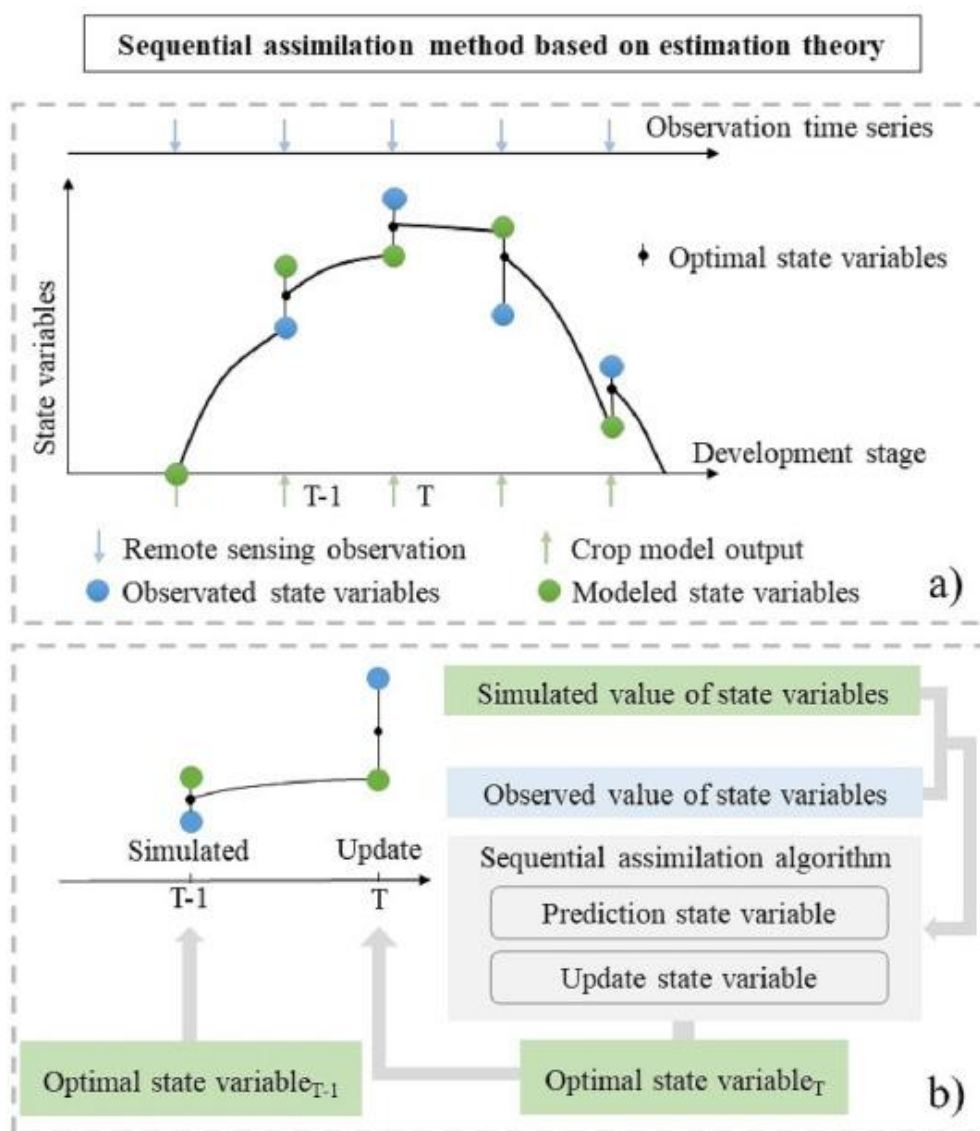
Inoltre, il sistema fornirà indicatori di performance agronomica cruciali, come l'efficienza nell'uso dell'acqua (Water Use Efficiency, WUE) e il numero di giorni in cui le colture hanno manifestato condizioni di stress idrico, permettendo così una valutazione accurata della resilienza e della gestione idrica delle colture.



**Figura 1** Piattaforma di simulazione per l'analisi della radiazione solare e della resa delle colture nell'impianto agrivoltaico.



Grazie all'integrazione di sensori in campo, telecamere RGB e/o sopralluoghi diretti, sarà possibile eseguire una calibrazione in tempo reale del modello, garantendo un miglioramento continuo dell'accuratezza delle previsioni e delle simulazioni. Di seguito viene presentato uno schema che illustra il processo di integrazione tra i dati misurati in campo e quelli simulati dal modello. Il processo di assimilazione dei dati, come rappresentato nella Figura 2, si concentra principalmente sull'indice di area fogliare (LAI), un parametro fondamentale per la stima della resa culturale. Questo indice sarà monitorato tramite sensori appositi, consentendo una valutazione accurata della vegetazione. Oltre al LAI, il modello integrerà anche: dati fenologici, acquisiti attraverso sopralluoghi condotti da agronomi; il contenuto di umidità del suolo, misurato tramite sensori volumetrici che rilevano il contenuto idrico del terreno.



**Figura 2** Schema del processo di assimilazione dei dati per la calibrazione in tempo reale del modello.

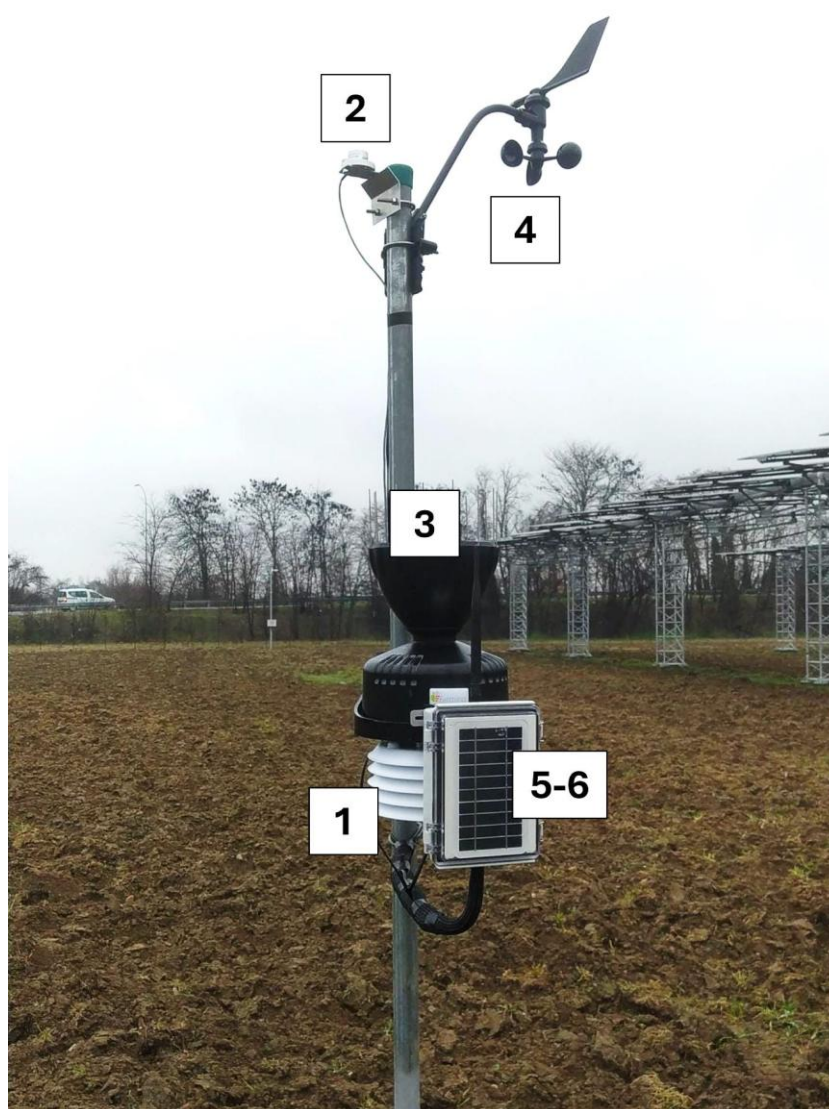


## 3.2 Monitoraggio del suolo e del microclima

In un'ottica di conservazione o recupero della fertilità de suolo, la dinamica di parametri legati alla qualità del suolo, quali sostanza organica e azoto totale, saranno monitorati con campionamenti quinquennale, eseguiti e analizzati presso i laboratori dell'Università Cattolica del Sacro Cuore.

Il monitoraggio microclimatico si avvarrà di sensori distribuiti in diversi nodi, denominati Nodo Piena Luce e Nodo Agrivoltaico. Un Nodo Piena Luce e un Nodo Agrivoltaico verranno installati in piena luce, mentre tre Nodi Agrivoltaico verranno posizionati sotto i pannelli, in punti con ombreggiamento elevato, medio e basso, selezionati sulla base delle stime fornite dalla piattaforma di simulazione dell'Università Cattolica del Sacro Cuore. I dati raccolti saranno utilizzati anche per validare le simulazioni del modello.

Il Nodo Piena Luce misura la temperatura, umidità, precipitazioni, radiazione solare, velocità e direzione del vento, come rappresentato nella Figura 3.



**Figura 3** Nodo Piena Luce installato presso l'impianto agrivoltaico sperimentale dell'Università Cattolica del Sacro Cuore di Piacenza.

Il Nodo Piena Luce include:

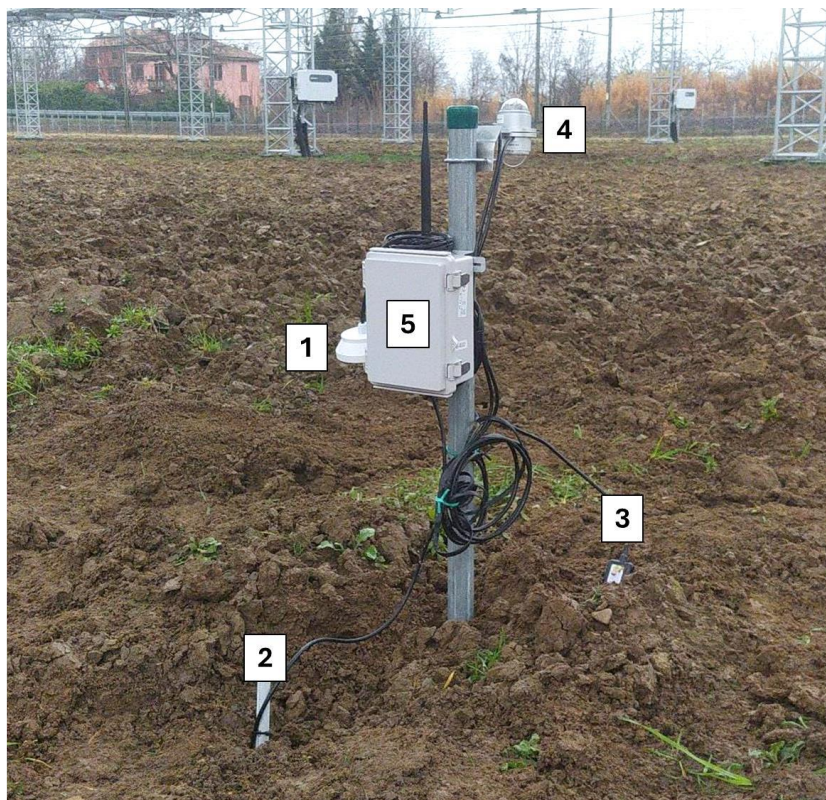
1. Sensore termoisigrometro per misurare l'umidità e temperatura dell'aria, posto all'interno di uno schermo solare passivo composto da una serie di piatti per garantire il massimo flusso d'aria e proteggere il sensore dalla radiazione solare e dalla pioggia.
2. Sensore radiometro per la misurazione dell'intensità della radiazione solare globale.
3. Sensore pluviometro per misurare la quantità di pioggia caduta tramite un dispositivo a bascula auto svuotante. Realizzato in policarbonato e resistente agli UV, è dotato di un imbuto aerodinamico che aumenta la precisione in condizioni di forte vento e dissuasore per volatili con punte in acciaio sul bordo. La superficie di raccolta è da 214 cm<sup>2</sup> e misura incrementi di 0,2 mm.
4. Sensore anemometro per la rilevazione di velocità e direzione del vento. Dotato di tre coppette e banderuola con punta in ottone per la massima precisione.
5. Pannello solare da 3W per la carica della batteria.
6. Trasmettitore dati con batteria alimentata da pannello solare interno ed antenna esterna.

Nella Tabella 1 seguente vengono elencati i parametri rilevati dal Nodo Piena Luce.

**Tabella 1** Specifiche tecniche dei sensori installati nel Nodo Piena Luce.

PARAMETRI	RISOLUZIONE	INTERVALLO DI MISURA	ACCURATEZZA (+/-)
Temperatura Aria	0.01°C	da -40 a +65°C	0.5°C
Umidità Aria	0.01%	da 1 a 100%	3%; 4% sopra il 90%
Precipitazioni	0.2 mm	da 0.2 a 999.8 mm	4% o 1 ribaltamento della vaschetta
Radiazione Solare	1 W/m <sup>2</sup>	da 0 a 1500 W/m <sup>2</sup>	5%
Velocità del Vento	0.1 Km/h 0.1 m/s	da 0 a 241 Km/h da 0 a 67 m/s	3 Km/h o 5% 1 m/s o 5%
Direzione del Vento	1°	da 0 a 359°	3°
Tensione Batteria	1 mV	da 2100 a 3600 mV	

Il Nodo Agrivoltaico misura la temperatura e umidità dell'aria e del suolo, nonché la radiazione solare, come rappresentato nella Figura 4.



**Figura 4** Nodo Agrivoltaico installato presso l'impianto agrivoltaico sperimentale dell'Università Cattolica del Sacro Cuore di Piacenza.

Il Nodo Agrivoltaico include:

1. Sensore termoigrometro per misurare l'umidità e temperatura dell'aria.
2. Sensore di temperatura suolo, costituito da una resistenza che varia a seconda della temperatura e incapsulato in un alloggiamento in acciaio inossidabile.
3. Sensore volumetrico per la misura del contenuto idrico del suolo di tipo FDR, utilizzando la riflettometria nel dominio della frequenza.
4. Sensore radiometro per la misurazione dell'intensità della radiazione solare diretta e riflessa, il cui rapporto è l'indice di albedo.
5. Trasmettitore dati alimentato a batteria con antenna.

Nella Tabella 2 seguente vengono elencati i parametri rilevati dal Nodo Agrivoltaico.

**Tabella 2** Specifiche tecniche dei sensori installati nel Nodo Agrivoltaico.

PARAMETRI	RISOLUZIONE	INTERVALLO DI MISURA	ACCURATEZZA (+/-)
Temperatura Aria	0.01°C	da -40 a +65°C	0.5°C
Umidità Aria	0.01%	da 1 a 100%	3%; 4% sopra il 90%
Temperatura Suolo	0.1°C	da -40°C a +80°C	±0.5°C
Umidità Suolo	0.001	da 0 a 100%	±3%
Radiazione Solare	1 W/m <sup>2</sup>	da 0 a 1500 W/m <sup>2</sup>	0.05
Tensione Batteria	1 mV	da 3100 a 3600 mV	

### 3.3 Protocollo di trasmissione e piattaforma di analisi dei dati

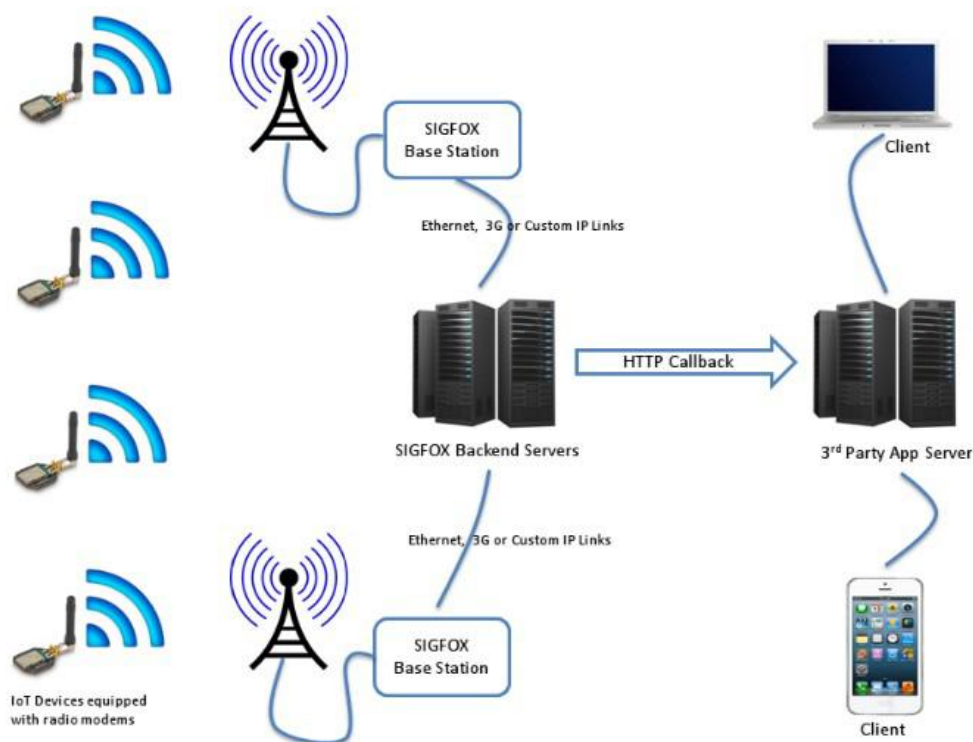
La trasmissione dei dati avverrà tramite tecnologie LPWAN (Low Power Wide Area Network) a basso consumo energetico: SIGFOX e LoRa. Entrambe operano sulla banda 868 MHz e permettono trasmissioni a lungo raggio (fino a 10 km in aree rurali) con consumi estremamente ridotti. Le centraline sono programmate per attivarsi ciclicamente, rilevare i dati e inviarli al backend cloud, che a sua volta li inoltra ai database utilizzati per la visualizzazione e l'analisi da parte dell'utente.

Ogni centralina dispone di un ID univoco che ne consente il tracciamento e la configurazione remota tramite backend. Dalla piattaforma cloud è possibile modificare in tempo reale parametri operativi, come la frequenza di campionamento o le soglie di allerta automatica.

La piattaforma è accessibile via web, applicazione mobile o REST API. Ogni dato può essere monitorato e associato a eventi automatici (come l'invio di notifiche e-mail in caso di superamento soglie).

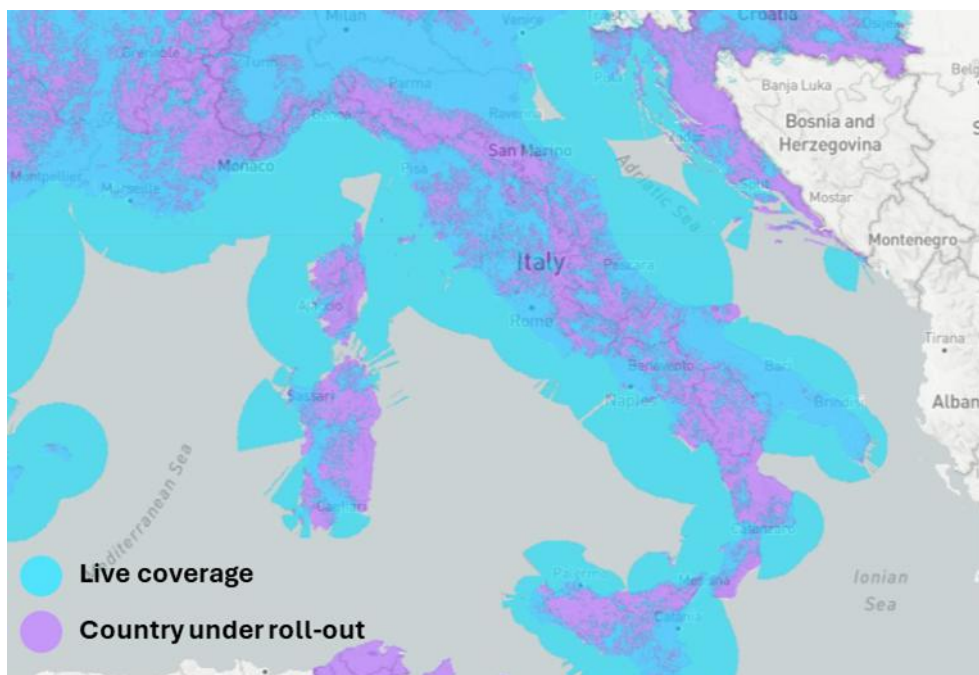
La rete utilizzata è SIGFOX, una rete gestita che solleva l'utente dalla necessità di gestire attività di installazione e manutenzione. SIGFOX è progettata per operare in modalità trasparente e 'out-of-the-box', permettendo così agli sviluppatori di concentrarsi esclusivamente sul contenuto principale del loro progetto, senza doversi preoccupare della gestione della comunicazione (Figura 5). Questa rete si basa sulla tecnologia LPWA (Low Power Wide Area), che consente una comunicazione bidirezionale tra il dispositivo e la rete, con la comunicazione sempre avviata dal dispositivo. SIGFOX è ottimizzata per la trasmissione di messaggi di dimensioni ridotte, inviati solo quando necessario, ed è pertanto inadatta per applicazioni a banda larga, come quelle che richiedono trasmissione multimediale o in tempo reale. Un significativo vantaggio della tecnologia SIGFOX è il basso consumo energetico dei dispositivi, che possono operare in modalità autonoma per diversi anni, rendendola particolarmente adatta per applicazioni IoT a lungo termine.





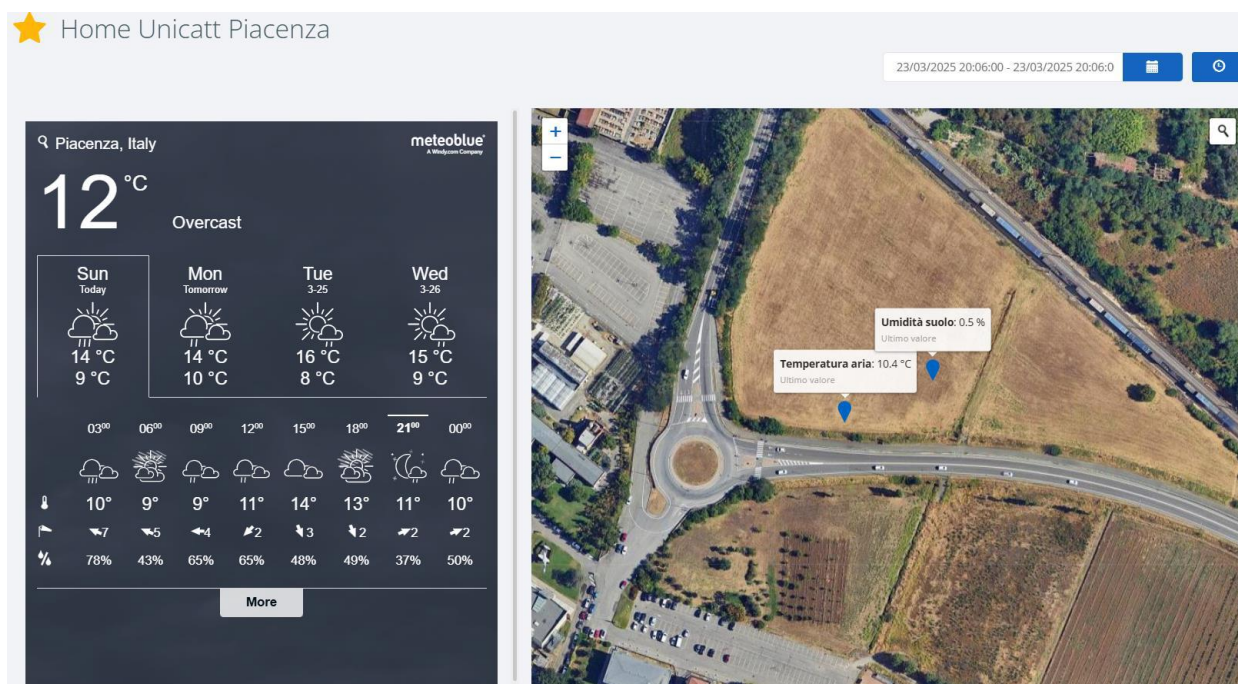
**Figura 5** Schema riassuntivo della trasmissione dati e del protocollo di comunicazione SIGFOX.

Per quanto riguarda la copertura della rete SIGFOX, Eitower è l'unico operatore italiano abilitato a implementare e gestire questa rete sul territorio nazionale, ricoprendo il ruolo di SNO (Sigfox Network Operator) in Italia. Tale iniziativa fa parte di un progetto globale coordinato da SIGFOX, volto allo sviluppo di un'infrastruttura di rete IoT per supportare una vasta gamma di applicazioni in ambito industriale e commerciale. Il progetto SIGFOX è già in fase di implementazione, con Eitower che, sfruttando le torri TLC e televisive esistenti, prevede di estendere la copertura a livello nazionale. Entro breve, saranno installate circa 1.000 stazioni base SIGFOX, assicurando una copertura completa e capillare, come illustrato nella Figura 6.

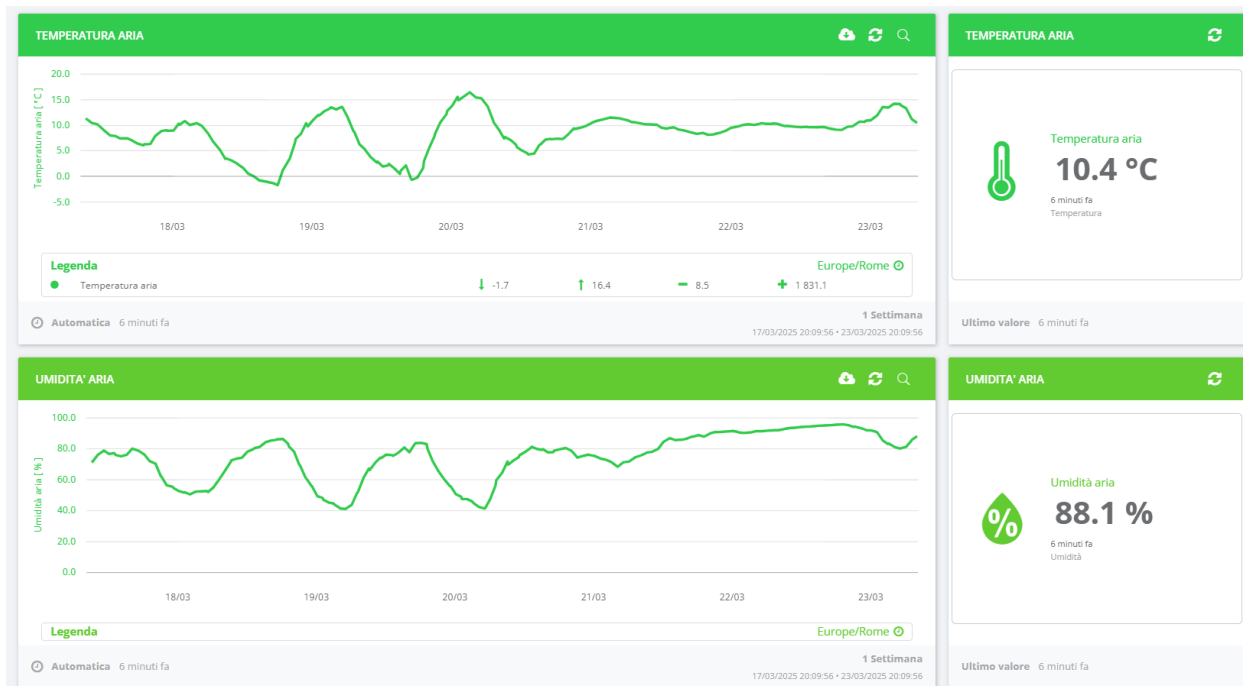


**Figura 6** Mappa della copertura nazionale delle stazioni base SIGFOX.

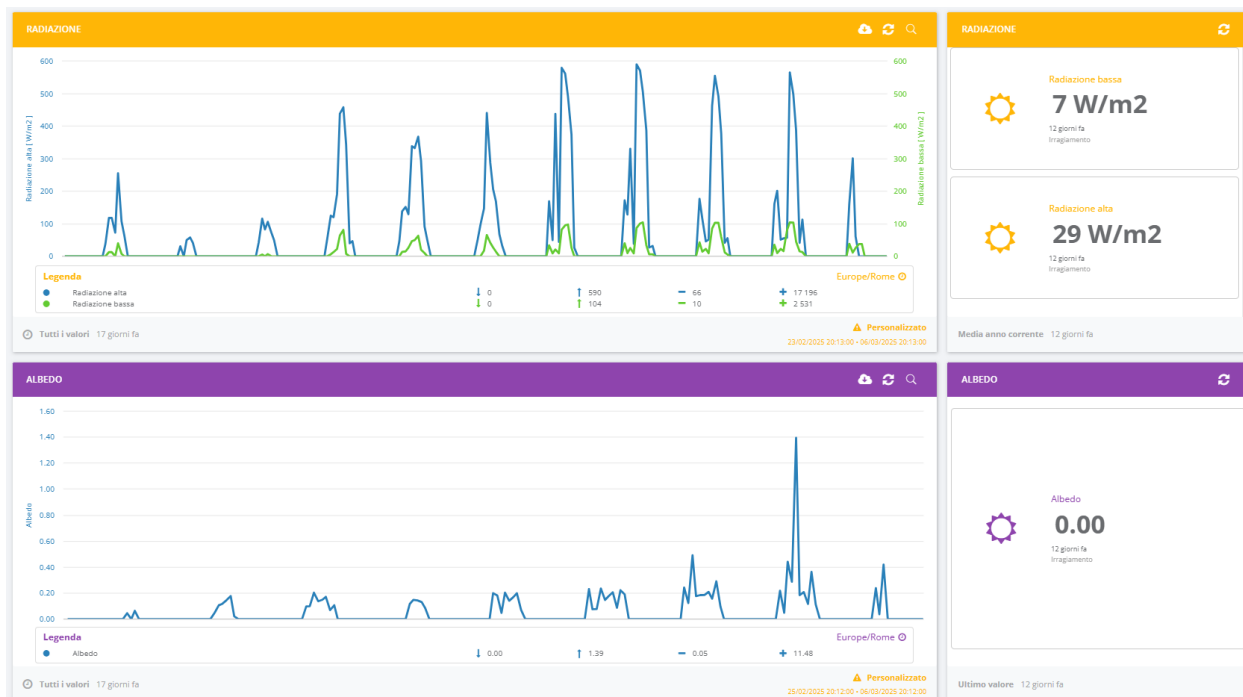
In caso di assenza di copertura Sigfox, è possibile installare delle mini-Base Station (mini-BS) che trasmettono i dati via ADSL o 4G. Queste unità sono leggere, trasportabili e pronte all'uso in pochi minuti. Con un consumo di soli 17–25W, possono operare autonomamente fino a 4 giorni e garantire una copertura di circa 5 km. Tutti i dati raccolti sono infine visualizzabili tramite una piattaforma che offre schermate intuitive per l'analisi, il download e il controllo in tempo reale dei parametri agronomici e climatici rilevati.



**Figura 7** Consultazione delle previsioni meteo e mappa riportante la posizione delle centraline geolocalizzate, con visualizzazione degli ultimi dati trasmessi.

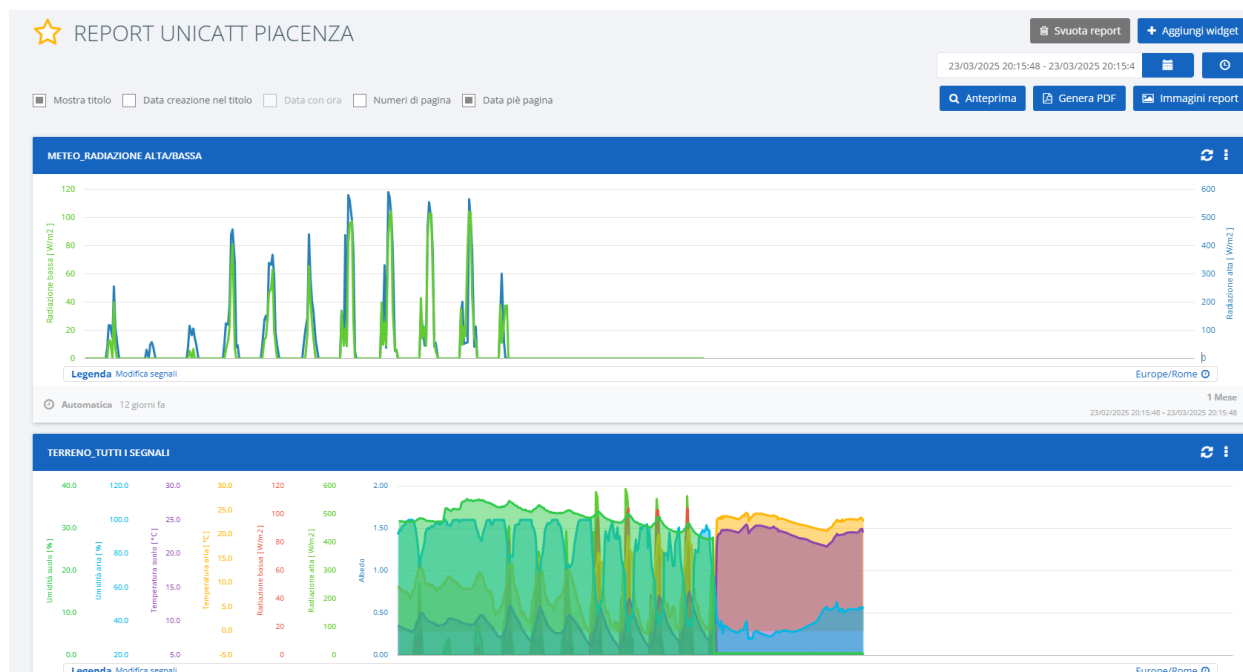


**Figura 8** Visualizzazione dei dati trasmessi in tempo reale dalla centralina con la possibilità per ogni segnale (come temperatura/umidità aria) di selezionare il range temporale.

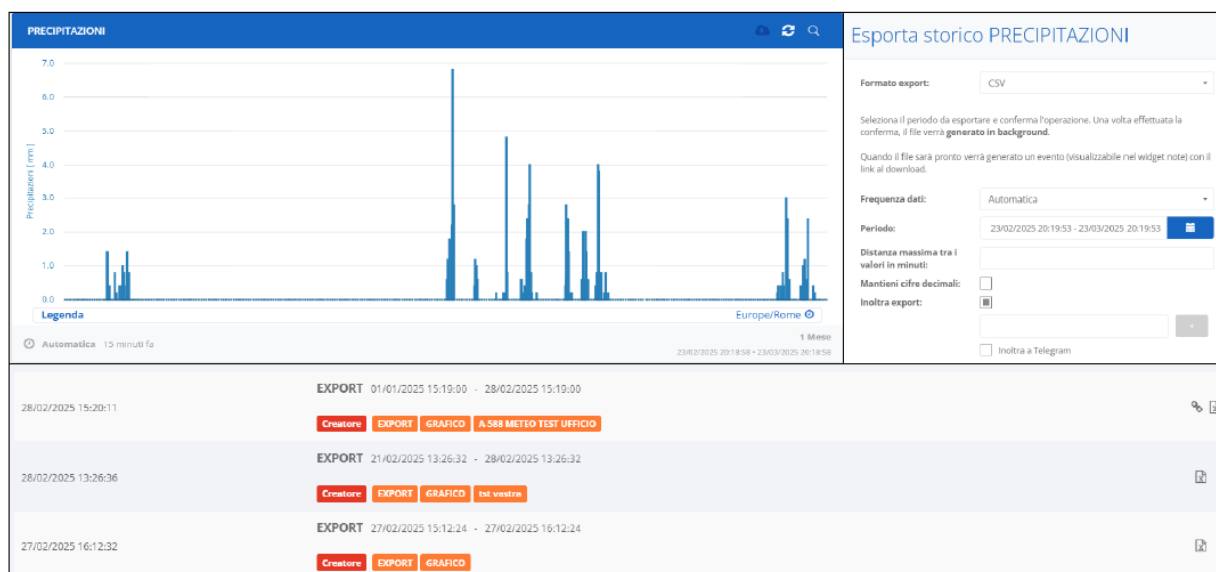


**Figura 9** Visualizzazione dei dati trasmessi in tempo reale dalla centralina con la possibilità per ogni segnale (come umidità suolo/albedo) di selezionare il range temporale.





**Figura 10** Creazione di grafici «personalizzati» con all'interno o uno più segnali (provenienti anche da device diversi) ed estrarre report in formato pdf.



**Figura 11** Scaricamento dei dati di uno o più segnali in formato CSV, o altri; il file si può inoltrare a un indirizzo mail o consultare direttamente nell'apposita sezione note all'interno dell'Home Page.

	<b>ALERT TEMPERATURA ARIA 1°C</b>	21/03/2025 05:15:09	21/03/2025 05:45:09	30 minuti	Mai	Creazione	TEMPERATURA ARIA		Riconosci	Aggiungi commento
	<b>ALERT TEMPERATURA ARIA 0°C</b>	21/03/2025 04:15:10	21/03/2025 07:15:09	3 ore	Mai	Creazione	TEMPERATURA ARIA		Riconosci	Aggiungi commento
	<b>ALERT METEO VENTO</b>	20/03/2025 11:10:17	20/03/2025 11:13:09	3 minuti	20/03/2025 12:24:45 Massimo Noferini	Creazione	VELOCITA' VENTO			Aggiungi commento

**Figura 12** Possibilità di inserire delle regole su ogni tipologia di segnale (con ad esempio delle soglie), al raggiungimento delle quali si riceve una notifica di allarme.

### 3.4 Proposta economica del piano di monitoraggio

Di seguito si riporta la stima dei costi del servizio di monitoraggio dell'impianto agrivoltaico, calcolati su un orizzonte operativo di 25 anni e indicizzati al tasso annuo del 2%. Il calcolo tiene conto della dimensione dell'impianto (15,81 MW) e distingue tra costi una tantum e costi ricorrenti (Tabella 3). Tutti i valori sono espressi al netto dell'IVA.

Il sistema di monitoraggio prevede l'acquisto, l'installazione e la manutenzione dei nodi di misura, la raccolta e registrazione dei dati, le attività agronomiche annuali, le analisi del suolo a cadenza pluriennale, l'utilizzo del quaderno di campagna e il software dedicato alla gestione e alla reportistica del sistema.

La tabella seguente riporta nel dettaglio le singole voci di costo, i relativi parametri di calcolo e il totale annuale e complessivo sul periodo considerato.

**Tabella 3** Riepilogo dei costi del piano di monitoraggio dell'impianto agrivoltaico (15,81 MW), con dettaglio delle singole voci di spesa, dei parametri di calcolo e dei costi annuali indicizzati su un orizzonte di 25 anni. Tutti i valori sono espressi al netto dell'IVA.

Voce di costo	Nodo Piena Luce	Manutenzione nodo Piena Luce	Nodo Agrivoltaico	Manutenzione nodo Agrivoltaico	Installazione nodi	Sistema di registrazione dati nodi	Raccolta dati agronomici	Analisi del suolo	Quaderno di campagna	Software e relazione di monitoraggio annuale	Totale annuale
Formula	Numero nodi × costo unitario	Manutenzione (10 % costo unitario/nodo)	Numero nodi × costo unitario	Manutenzione (10 % costo unitario/nodo)	Costo una tantum	Costo annuale × numero nodi	N° interventi × costo intervento	Costo annuale (ogni 5 anni)	Costo annuale	Costo annuale × MW agrivoltaico	
Valore unitario	3.000 €	10%	2.000 €	10%	500 €	50 €	300 €	1.000 €	800 €	500 €	
Quantità	2	2	4	4		6	3				
Anno 1	6.000 €		8.000 €		500 €	300 €	900 €	1.000 €	800 €	7.905 €	25.405 €
Anno 2		624 €		832 €		312 €	936 €		832 €	8.224 €	11.762 €
Anno 3		637 €		849 €		318 €	955 €		849 €	8.389 €	11.997 €
Anno 4		649 €		866 €		325 €	974 €		866 €	8.557 €	12.237 €
Anno 5		662 €		883 €		331 €	994 €	1.104 €	883 €	8.728 €	13.586 €
Anno 6		676 €		901 €		338 €	1.014 €		901 €	8.902 €	12.731 €
Anno 7		689 €		919 €		345 €	1.034 €		919 €	9.080 €	12.986 €
Anno 8		703 €		937 €		351 €	1.054 €		937 €	9.262 €	13.246 €
Anno 9		717 €		956 €		359 €	1.076 €		956 €	9.447 €	13.511 €
Anno 10		731 €		975 €		366 €	1.097 €	1.219 €	975 €	9.636 €	15.000 €
Anno 11		746 €		995 €		373 €	1.119 €		995 €	9.829 €	14.056 €
Anno 12		761 €		1.015 €		380 €	1.141 €		1.015 €	10.025 €	14.337 €
Anno 13		776 €		1.035 €		388 €	1.164 €		1.035 €	10.226 €	14.624 €
Anno 14		792 €		1.056 €		396 €	1.188 €		1.056 €	10.430 €	14.917 €
Anno 15		808 €		1.077 €		404 €	1.211 €	1.346 €	1.077 €	10.639 €	16.561 €
Anno 16		824 €		1.098 €		412 €	1.236 €		1.098 €	10.852 €	15.519 €
Anno 17		840 €		1.120 €		420 €	1.260 €		1.120 €	11.069 €	15.830 €
Anno 18		857 €		1.143 €		428 €	1.285 €		1.143 €	11.290 €	16.146 €
Anno 19		874 €		1.165 €		437 €	1.311 €		1.165 €	11.516 €	16.469 €
Anno 20		892 €		1.189 €		446 €	1.337 €	1.486 €	1.189 €	11.746 €	18.285 €
Anno 21		909 €		1.213 €		455 €	1.364 €		1.213 €	11.981 €	17.135 €
Anno 22		928 €		1.237 €		464 €	1.391 €		1.237 €	12.221 €	17.477 €
Anno 23		946 €		1.262 €		473 €	1.419 €		1.262 €	12.465 €	17.827 €
Anno 24		965 €		1.287 €		483 €	1.448 €		1.287 €	12.715 €	18.183 €
Anno 25		984 €		1.312 €		492 €	1.477 €	1.641 €	1.312 €	12.969 €	20.188 €
<b>Totale servizio</b>	6.000 €	18.991 €	8.000 €	25.321 €	500 €	9.795 €	29.386 €	7.795 €	26.121 €	258.105 €	<b>390.014 €</b>

## 4 Bibliografia

- Amaducci, S., Yin, X., & Colauzzi, M. (2018). Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. In *Applied Energy* (Vol. 220, pp. 545–561). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.081>
- Barron-Gafford, G.A., Pavao-Zuckerman, M.A., Minor, R.L., Sutter, L.F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D.T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A.K., Nabhan, G.P., Macknick, J.E., 2019. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability* 2, 848–855. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>
- Bellone, Y., Croci, M., Impollonia, G., Nik Zad, A., Colauzzi, M., Campana, P. E., & Amaducci, S. (2024). Simulation-Based Decision Support for Agrivoltaic Systems. In *Applied Energy* (Vol. 369, p. 123490). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123490>
- Dupraz, C., 2023. Assessment of the ground coverage ratio of agrivoltaic systems as a proxy for potential crop productivity. *Agroforest Syst.* <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00906-3>
- Elamri, Y., Chevion, B., Lopez, J.M., Dejean, C., Belaud, G., 2018. Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. *Agricultural Water Management* 208, 440–453. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.001>
- MiTE, 2022. Linee Guida in materia di Impianti Agrivoltaici. Ministero della Transizione Ecologica MiTE, Roma, Italia.
- Sturchio, M.A., Kannenberg, S.A., Knapp, A.K., 2024. Agrivoltaic arrays can maintain semi-arid grassland productivity and extend the seasonality of forage quality. *Applied Energy* 356, 122418. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122418>