



# AGRIVOLT-ER

## Progetto Agrivolt-ER Deliverabile 1.1

# Report scientifico sugli indici di performance per gli impianti agrivoltaici



Cofinanziato  
dall'Unione europea



 Regione Emilia-Romagna

**Agrivolt-ER** è un progetto cofinanziato dal PR FESR Emilia-Romagna Programma 2021-2027.  
Azione 1.1.2 "Supporto a progetti di ricerca collaborativa dei laboratori di ricerca e delle università con le imprese".  
Bando per progetti di ricerca industriale strategica rivolti agli ambienti prioritari della strategia di specializzazione  
intelligente 2023-2024.



## Sommario

1. Introduzione.....	2
2. Indici di performance.....	3
2.1. Efficienza d'uso del suolo (LER).....	4
2.2. Resa agricola relativa (RAR).....	5
2.3. Generazione energetica relativa (GER).....	7
2.4. Energia generata per ettaro (Ye).....	8
2.5. Ore equivalenti (Yoe).....	9
2.6. Consumo idrico ed efficienza d'uso dell'acqua (WUE).....	9
2.7. Costo livellato dell'energia (LCOE).....	10
3. Bibliografia.....	12



## 1. Introduzione

Esistono diverse tipologie di sistemi Agrivoltaici (AV) che possono differire tra loro per aspetti tecnici come layout dei moduli, tipologia di struttura di supporto, angolo ed orientamento dei moduli fotovoltaici e tecnologia. Tuttavia, lo stesso tipo di sistema AV può essere ulteriormente ottimizzato in fase di progettazione, variando la distanza tra i filari, nota come pitch, che a sua volta influisce sul Ground Coverage Ratio (GCR), il quale determina la densità dei moduli fotovoltaici per unità di superficie. L'elevata variabilità con cui i sistemi AV possono essere progettati rende complesso il confronto tra due impianti differenti, specialmente se posti in località geografiche diverse. Da questa problematica, deriva la necessità di individuare i parametri da porre a confronto al fine di poter valutare le performance di due sistemi AV differenti.

Qualsiasi valore misurabile utilizzato come indicatore per valutare le prestazioni di un sistema può essere definito come un indice di performance, noto anche come Key Performance Indicator (KPI).

Nel contesto dei sistemi AV, i KPI consentono di individuare le configurazioni e le modalità di gestione ottimali degli impianti, al fine di massimizzare la sinergia tra colture e pannelli fotovoltaici. Inoltre, permettono di effettuare una valutazione comparativa tra sistemi AV che utilizzano diverse soluzioni tecnologiche, tenendo conto sia dell'ambiente in cui sono installati sia delle colture ospitate.

I KPI possono essere definiti per quantificare le prestazioni dei sistemi AV rispetto a specifici fattori, come quelli i) **ambientali** con riferimento all'impatto che gli impianti AV hanno sull'ambiente, ii) **agronomici** con riferimento alle colture o alle caratteristiche del suolo, iii) **energetici** relativi alla capacità del sistema di generare energia e all'efficienza con cui tale energia viene prodotta ed iv) **economici** riferiti alla sostenibilità economica dell'impianto, sia in termini di capitale necessario per coprire l'investimento iniziale, sia in relazione alla capacità del sistema di ammortizzare i costi sostenuti entro un determinato numero di anni di attività.

Pertanto, nell'ambito del progetto Agrivolt-ER, che si propone di sviluppare le conoscenze e gli strumenti necessari per la realizzazione di impianti "AV avanzati" ottimizzati sui principali KPI. Questi, attraverso un processo di coinvolgimento partecipativo dei principali stakeholder nel rispetto delle normative del settore, sono stati **identificati e categorizzati** in:

- **KPI di rilevanza ambientale** per l'identificazione dell'effetto del sistema Agrivoltaico sull'ambiente, tra cui il **rapporto equivalente suolo (LER)** che valuta la produttività dei terreni per sistemi AV rispetto agli impianti fotovoltaici tradizionali;
- **KPI di rilevanza agronomica** per l'identificazione dell'effetto del sistema Agrivoltaico sulla resa agricola e sul risparmio idrico, tra cui, la **resa agricola relativa (RAR)**, che mette in relazione la produzione ottenuta in AV in confronto a quella di un campo posto in piena luce e l'**efficienza d'uso dell'acqua (WUE)**, per valutare il consumo idrico di un'unità di prodotto agricolo, che può variare in



funzione delle condizioni di irraggiamento;

- **KPI di rilevanza energetica**, tra cui Conversione di energia elettrica per ettaro ( $MWh\ ha^{-1}$ ), **Ore equivalenti (Yoe)** [ $kWh/kWp$ ] che è utilizzato anche per indicare l'efficienza con cui un sistema fotovoltaico genera energia sulla base della potenza installata e conversione energetica relativa, utile per confrontare la capacità di un sistema AV di generare energia in confronto con un sistema fotovoltaico di riferimento;
- **KPI di rilevanza economica**, il cui principale è rappresentato dal **costo dell'energia livellato (LCOE)**, un parametro che sintetizza la capacità di un sistema AV di fornire, entro la vita utile dell'impianto, il ritorno del capitale finanziario investito per l'imprenditore.

In base ai KPI individuati, è possibile valutare una serie di **scenari di gestione** delle colture e dei pannelli fotovoltaici al fine di sviluppare una maggior conoscenza sull'interazione da produzione agricola e conversione energetica in ambito AV e per individuare soluzioni di gestione AV in cui sia massimizzata la sinergia tra colture e pannelli fotovoltaici.

Pertanto, questo documento ha l'obiettivo di illustrare il ruolo e le modalità di calcolo degli indici di performance (KPI) adottati nell'ambito del progetto Agrivolt-ER per la valutazione e l'ottimizzazione dei sistemi agrivoltaici (AV).

## 2. Indici di performance

Nel seguente capitolo sono descritti i KPI individuati nella fase iniziale del progetto e per ciascuno di essi sono illustrate, una definizione, le modalità di calcolo e le potenzialità applicative. In Tabella 1 sono riassunti i KPI adottati nel progetto Agrivolt-ER per valutare o ottimizzare i sistemi AV.

**Tabella 1.** Categorie degli indici di performance (KPI) e loro denominazione

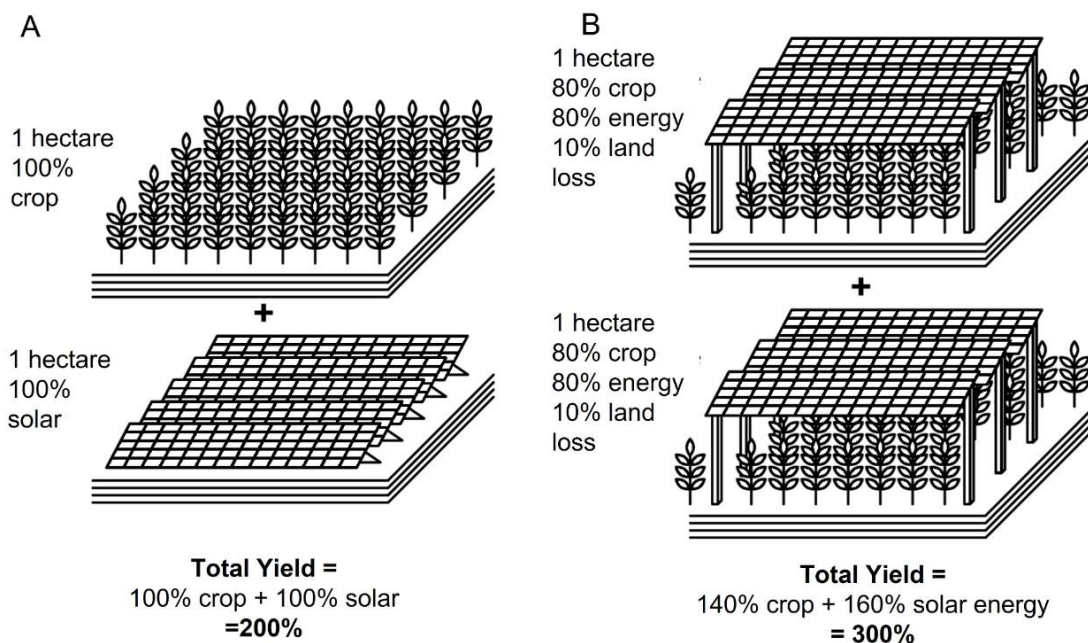
Categoria	Denominazione	Abbreviazione	Unità di misura
KPI Ambientali	Rapporto equivalente suolo	LER	-
KPI Agronomici	Resa agricola relativa	RAR	-
	Efficienza d'uso dell'acqua	WUE	$[m^3_{H_2O}] / t\ SS\ (m^3_{H_2O})^{-1}$
KPI Energetici	Generazione energetica relativa	GER	-
	Resa energetica annuale	YE	$MWh/ha/anno$
	Ore equivalenti	YOE	$kWh/kWp$
KPI Economici	Costo dell'energia livellato	LCOE	$€\ (MWh)^{-1}$



## 2.1. Efficienza d'uso del suolo (LER)

L'indice di efficienza d'uso del suolo, comunemente noto come *Land Equivalent Ratio* (LER), è nato in campo agroforestale per indicare l'incremento di produttività per superficie di suolo in caso di consociazioni agricole e agroforestali (Riley, 1984, Smith *et al.*, 2014). Allo stesso modo è possibile utilizzare questo stesso indice per calcolare l'efficienza d'uso del suolo quando un impianto fotovoltaico viene associato ad una produzione agricola.

L'incremento del LER in caso di integrazione agrivoltaica è stato dimostrato inizialmente nello studio di Dupraz *et al.* (2011) e, successivamente, il concetto è stato ampiamente adottato negli studi di settore pubblicati (Campana *et al.*, 2021; Garrod *et al.*, 2024; Trommsdorff *et al.*, 2021; Valle *et al.*, 2017; Willockx *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2024; Zheng *et al.*, 2021). Il principio alla base è schematizzato in Figura 1.



**Figura 1.** Esempio teorico di sistemi separati di agricoltura e fotovoltaico a terra (A) e l'uso combinato del suolo per svolgere entrambe le attività sulla medesima superficie di suolo (B). L'esempio ipotizza l'uso di due ettari di suolo che se combinati con un sistema AV possono portare ad incrementarne l'efficienza d'uso del 50 % (Asaà *et al.*, 2024)

Il LER si calcola dal rapporto della produzione agricola ottenuta in agrivoltaico e la produzione agricola ottenuta in piena luce (o controllo non ombreggiato), cui viene sommato il rapporto tra la generazione di energia fornita dal sistema AV e la generazione di energia che si sarebbe ottenuta da un sistema fotovoltaico di riferimento (Trommsdorff *et al.*, 2021). Il calcolo del LER è presentato in Equazione 1.

$$LER = \frac{P_{AV}}{P_{FL}} + \frac{E_{AV}}{E_{Ref}} \quad (\text{Eq. 1})$$



Dove:  $P_{AV}$  rappresenta la produzione agricola per ettaro ottenuta in AV;  $P_{FL}$  è la produzione agricola per ettaro ottenuta in condizione di piena luce;  $E_{AV}$  rappresenta l'energia generata da un ettaro di sistema agrivoltaico;  $E_{Ref}$  rappresenta la generazione di energia di impianto fotovoltaico di riferimento che occupa una superficie di un ettaro.

Un sistema AV con LER >1 permette di ottenere un'efficienza d'uso del suolo maggiore rispetto allo svolgimento delle due attività (agricoltura e generazione di energia) su superfici separate. Al contrario, un LER < 1 indica una minore efficienza d'uso del suolo conseguente all'integrazione agrivoltaica.

Il LER è spesso utilizzato per rispondere a una delle principali critiche rivolte ai sistemi fotovoltaici, in particolare quelli installati a terra, poiché gli impianti fotovoltaici convenzionali su larga scala, montati su terreni agricoli, competono con la produzione alimentare (Capellán-Pérez et al., 2017). Nell'equazione del LER (Eq. 1), il primo termine del secondo membro,  $\frac{P_{AV}}{P_{FL}}$ , rappresenta la resa agricola relativa (RAR), mentre il secondo termine del secondo membro,  $\frac{E_{AV}}{E_{Ref}}$ , rappresenta la conversione energetica relativa. Al fine di effettuare valutazioni più bilanciate sulle performance di un sistema AV è possibile considerare separatamente questi due termini come KPI indipendenti (Ahmed et al., 2022; Bellone et al., 2024) che vengono di seguito descritti.

## 2.2. Resa agricola relativa (RAR)

La resa agricola relativa o (RAR) è un KPI principale per la valutazione delle performance di un sistema AV in considerazione del fatto che in alcuni paesi, come Francia, Germania, Giappone e Sud Korea, è stato imposto un limite normativo alla riduzione di resa delle colture quando inserite in un sistema colturale AV (Ahmed et al., 2022; Bellone et al., 2024). La minima produzione agricola che si deve realizzare in un impianto agrivoltaico in confronto con la produzione agricola in piena luce è del 90% in Francia, 66% in Germania, 80% in Giappone e 80% in Sud Korea (Dupraz, 2023). Per quanto riguarda l'Italia, non esiste un vero e proprio limite normativo alla riduzione della produttività agricola in AV, tuttavia, con la prassi di riferimento UNI/PdR 148:2023 è stato proposto il limite del 70% (Svanera et al., 2023). Inoltre, in Italia al fine di ottenere e mantenere i sussidi previsti per gli aventi diritto in seguito all'installazione di un impianto agrivoltaico avanzato, attraverso il decreto agrivoltaico del 2023 è stato imposto l'obbligo di mantenere la produzione lorda vendibile (PLV) superiore al 70% rispetto la PLV di una produzione in piena luce. Questo parametro, pur avendo natura economica è correlato con la produttività agricola relativa.

La RAR viene calcolata come rapporto tra la resa agricola ottenuta in condizioni AV e la resa agricola ottenuta in condizioni di piena luce come riportato in Equazione 2:

$$RAR = \frac{P_{AV}}{P_{FL}} \quad (\text{Eq.2})$$

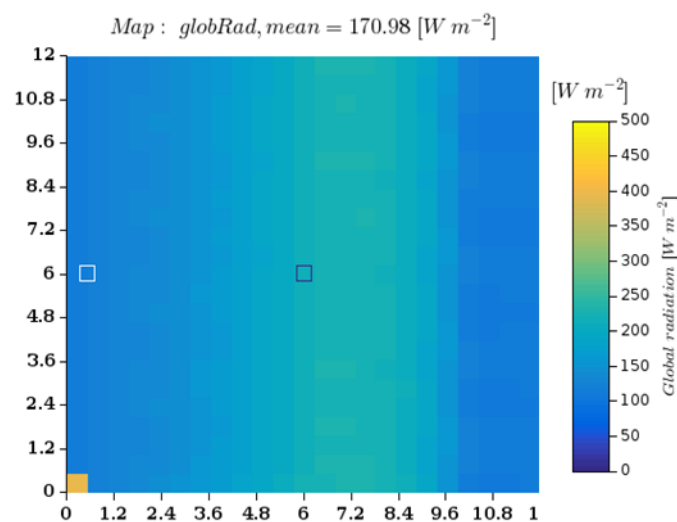


Dove:  $P_{AV}$  rappresenta la produzione agricola integrata ad impianti AV per ettaro di superficie e  $P_{FL}$  rappresenta la produzione agricola per ettaro di superficie in piena luce.

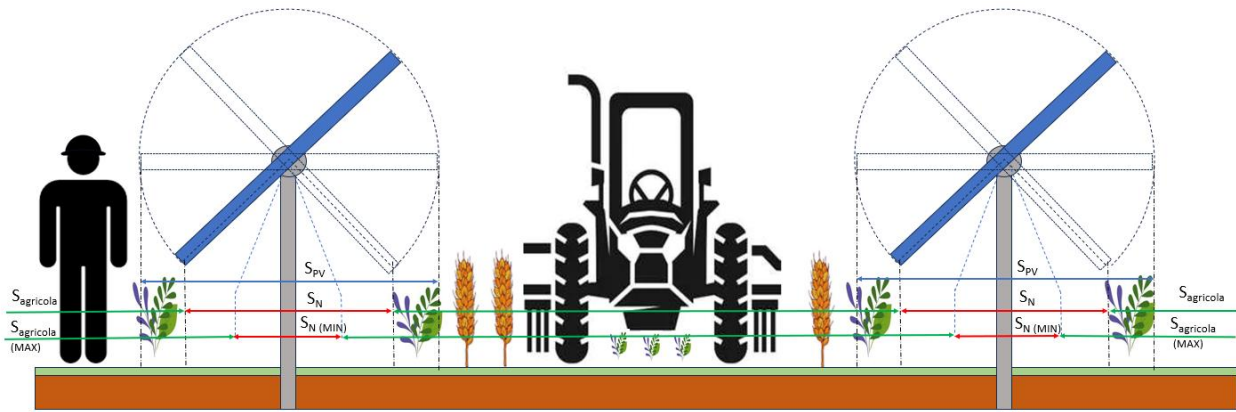
Una RAR pari a 1 indica che la resa agricola ottenuta in AV è pari a quella ottenuta nel controllo in piena luce. Un RAR  $>1$  indica che la coltura in AV ha avuto una resa superiore rispetto il controllo in piena luce. Al contrario una RAR  $< 1$  indica una perdita di prodotto agricolo nel confronto AV / piena luce.

Diversi studi hanno evidenziato che la produzione agricola ottenuta in agrivoltaico sia inferiore rispetto alla produzione delle colture in piena luce (Dupraz, 2023).

Questa discrepanza tra le due produzioni è dovuta principalmente alla diminuita disponibilità di radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) (Figura 2) per le colture coltivate al disotto dei moduli del sistema AV (Lu et al., 2022; Magarelli et al., 2024) a cui vanno sommate le perdite produttive legate alle fasce di suolo non coltivabili poste al disotto dei moduli fotovoltaici (Campana et al., 2021; Dinesh and Pearce, 2016; Gomez-Casnovas et al., 2023) come illustrato in Figura 3.



**Figura 2.** Mappa di radiazione globale media per un impianto AV sopraelevato dotato di sistema di inseguimento solare a doppio asse. La mappa mostra lo spazio di suolo compreso tra due filari AV. È possibile notare che l'irradianza che raggiunge il suolo è più elevata nella porzione centrale rispetto ai bordi che ricadono nella proiezione dei moduli fotovoltaici (Potenza et al., 2022).



**Figura 3.** Rappresentazione schematica di un profilo di impianto AV dove sono evidenziate le porzioni di terreno non coltivabili in caso di sistema AV base (definito come un sistema AV con altezza minima dei moduli inferiore a 2.10 m).  $S_N$  rappresenta la fascia non coltivabile per motivi di sicurezza, data la vicinanza delle strutture di sostegno, e di praticità, data la possibilità che i moduli possano urtare la coltura quando posizionati alla massima inclinazione.

È possibile calcolare la RAR in due modalità:

- Attraverso prove sperimentali di campo, prevedendo l'esistenza di una parcella di controllo in piena luce;
- Attraverso lo svolgimento di simulazioni informatiche mosse da modelli ibridi capaci di stimare la distribuzione dell'irradianza in campo e la produttività delle colture (Amaducci et al., 2018; Campana et al., 2021; Dupraz et al., 2011; Ko et al., 2021).

### 2.3. Generazione energetica relativa (GER)

Il secondo termine del secondo membro dell'equazione del LER (Eq. 1) indica la generazione energetica relativa (GER) ed è calcolato secondo l'equazione 3:

$$GER = \frac{E_{AV}}{E_{Ref}} \quad (\text{Eq.3})$$

Dove:  $E_{AV}$  è l'energia generata da un sistema AV esteso per un ettaro in un anno [kWh/ha/anno] e  $E_{Ref}$  è l'energia generata da un sistema fotovoltaico di riferimento esteso per un ettaro in un anno [kWh/ha/anno].

Un  $GER > 1$  indica che rispetto al sistema di riferimento, il sistema AV è capace di generare una maggiore quantità di energia; al contrario, un valore  $< 1$  indica che il sistema AV genera meno energia di quella che sarebbe stata generata da un sistema fotovoltaico in quelle condizioni ambientali. La generazione di energia per ettaro è positivamente correlata con il GCR che indica la superficie totale di moduli fotovoltaici che insiste sulla superficie di suolo impiegata dal sistema stesso. Considerando una tipologia di sistema AV, diminuendo lo spazio tra i filari (pitch), il GCR aumenta.



Secondo le linee guida rilasciate dal ministero della transizione ecologica nel 2022, il sistema fotovoltaico di riferimento è costituito da un sistema fisso montato a terra avente moduli con efficienza 20% installati su supporti fissi orientati a Sud e inclinati con un angolo pari alla latitudine meno 10 gradi collocato nello stesso sito dell'impianto agrivoltaico (MiTE, 2022). Tuttavia, questo tipo di impianto è ormai obsoleto e non corrisponde al reale sistema fotovoltaico di riferimento oggi maggiormente impiegato dalle aziende multiutility. Per questo alcuni autori hanno deciso di adottare come sistema fotovoltaico di riferimento un sistema ad inseguimento solare mono-assiale con layout dei moduli 2P e GCR del 50% al fine di non avvantaggiare eccessivamente il sistema agrivoltaico che altrimenti grazie alle tecnologie di inseguimento solare potrebbe garantire una generazione energetica superiore rispetto al sistema di riferimento anche con densità di moduli inferiori rispetto il sistema di riferimento (Bellone et al., 2024; Willockx and Cappelle, 2022).

Rispetto ad un sistema fotovoltaico standard, l'agrivoltaico necessita di spazi più ampi tra i filari di moduli fotovoltaici e di una altezza dei moduli dal suolo maggiore, per permettere il corretto passaggio delle macchine operatrici (Lee et al., 2023; Reher et al., 2024; Schindele et al., 2020). Questa esigenza di spazi si traduce con la necessità di adottare un GCR inferiore per i sistemi AV rispetto i comuni impianti fotovoltaici.

## 2.4. Energia generata per ettaro ( $Y_e$ )

L'energia generata per ettaro o *Energy Yield* ( $Y_e$ ) [kWh/ha/anno] è impiegata anche per stimare il termine dell'equazione del LER legato alla generazione di energia (GER) (Bellone et al., 2024) e viene calcolato come riportato in Equazione 4:

$$Y_e = \frac{E_{av}}{A} \quad (4)$$

Dove  $E_{av}$  è la conversione annuale di energia solare in energia elettrica realizzata dall'impianto e  $A$  rappresenta l'area impegnata dal sistema AV.

Incrementando la densità di moduli per ettaro la generazione di energia per superficie di suolo aumenta, ma allo stesso tempo l'efficienza dell'impianto diminuisce a causa dell'ombreggiamento reciproco tra i moduli (Tonita et al., 2023).

Le informazioni sull'energia prodotta da un sistema AV possono essere ricavate dagli inverter presenti sul campo. Tuttavia, è anche possibile eseguire dei calcoli previsionali attraverso l'utilizzo di software simulativi come PV syst ([www.pvsyst.com](http://www.pvsyst.com)) e PVsol ([www.valentin-software.com/pvsol](http://www.valentin-software.com/pvsol)). I software di simulazione per i calcoli delle performance energetiche dei sistemi fotovoltaici necessitano di input tecnici del sistema oggetto di studio e di dati meteo relativi all'area in cui il sistema è posto. Le simulazioni restituiranno i risultati dell'energia prodotta in uno specifico anno da quel particolare sistema simulato.



## 2.5. Ore equivalenti (Yoe)

Con ore equivalenti o *specific energy yield* (Yoe), si intende il numero di ore annue durante le quali un impianto, ipoteticamente, genera elettricità alla potenza nominale e sono pari al rapporto tra la produzione lorda generata in un anno e la potenza nominale dell'impianto. Il calcolo delle ore equivalenti è presentato nell'equazione 5:

$$Yoe = \frac{kWh}{kWp} \quad (\text{Eq. 5})$$

Dove: kWh rappresenta l'energia generata dall'intero sistema AV in un anno e kWp rappresenta la potenza nominale installata dell'intero impianto.

Il Yoe è un indice che permette di ottenere informazioni sull'efficienza con cui uno specifico sistema AV è capace di generare energia in base alla potenza installata e alle soluzioni tecnologiche impiegate (inseguimento solare). Questo indice aumenta con l'aumentare della distanza tra i filari fotovoltaici (*pitch*) dal momento che sulla base di una determinata potenza installata, aumentando la distanza dei filari è possibile generare più energia perché vengono ridotte le inefficienze causate dall'ombreggiamento reciproco tra i moduli. È possibile calcolare questo KPI con le stesse modalità dell'energia generata per ettaro ( $Y_e$ ).

## 2.6. Consumo idrico ed efficienza d'uso dell'acqua (WUE)

L'installazione di un impianto AV altera la distribuzione dell'irradianza al suolo (Gomez-Casnovas et al., 2023; Sturchio et al., 2022); questo influisce direttamente sull'evaporazione del suolo e la traspirazione delle colture, la cui somma costituisce l'evapotraspirazione.

La capacità di un sistema AV di promuovere un uso efficiente dell'acqua, specialmente dell'acqua irrigua, rappresenta uno degli aspetti più interessanti di questa consociazione (Warmann et al., 2024). L'efficienza d'uso dell'acqua, comunemente nota come *water use efficiency* (WUE) [ $\text{t m}^{-3}$ ], può essere definita come la massa di prodotto agricolo ottenuta con il volume di acqua consumato dalla coltura attraverso l'evapotraspirazione (ET) per ottenere quella determinata produzione (Elamri et al., 2018) (equazione 6):

$$WUE = \frac{P_{AV}}{\sum ET_c} \quad (\text{Eq. 6})$$

Dove:  $P_{AV}$  rappresenta la produzione agricola per ettaro [ $\text{t ha}^{-1}$ ] e  $\sum ET_c$  rappresenta la sommatoria dell'evapotraspirazione colturale giornaliera per ettaro [ $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ] corrispondente a quella resa.

Il calcolo dell'evapotraspirazione della coltura (ET<sub>c</sub>) può essere effettuato utilizzando il metodo di Penman-Monteith (Allen, 2005).



Oppure, la  $WUE$  può essere definita come la massa di prodotto agricolo ottenuta attraverso l'impiego del volume di acqua irrigua fornita durante l'intero ciclo colturale (Elamri et al., 2018), equazione 7:

$$WUE = \frac{P_{AV}}{Irrig} \quad (\text{Eq. 7})$$

Dove:  $Irrig$  rappresenta il volume di acqua utilizzato per ottenere quella data produzione agricola per ettaro [ $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ].

Qualora sia necessario confrontare direttamente una coltura in AV con una in piena luce per ottenere informazioni sull'efficienza dell'uso dell'acqua, è possibile utilizzare il rapporto riportato nell'equazione 8:

$$R\_WUE = \frac{WUE_{AV}}{WUE_{ref}} \quad (\text{Eq. 8})$$

Dove:  $WUE_{AV}$  è la  $WUE$  calcolata per la coltura in AV e  $WUE_{ref}$  è la  $WUE$  calcolata per la coltura in piena luce (controllo non ombreggiato).

Una  $R\_WUE > 1$  indica che la coltura in AV ha consumato meno acqua per unità di massa prodotta rispetto la coltura in piena luce.

## 2.7. Costo livellato dell'energia (LCOE)

I calcoli del costo livellato dell'energia, comunemente noto come *Levelized cost of electricity* (LCOE), si basano sul rapporto attualizzato tra il valore attuale del capitale totale investito durante tutta la vita economica dell'impianto di generazione e il totale dell'output energetico fornito da quell'impianto di generazione energetica. Questo metodo è utilizzato per confrontare i costi di differenti centrali elettriche o diverse tecnologie di generazione (Zainali et al., 2023).

In fase progettuale l'analisi del LCOE è un indicatore che rende possibile il confronto tra differenti tipologie di sistemi AV su una base economica (Schindele et al., 2020). Per poterlo calcolare è necessario avere informazioni approfondite per quanto riguarda tutte le voci di costo sostenute per la costruzione ed il mantenimento dell'impianto, in particolare:

- CAPEX che riguarda il capitale iniziale per l'installazione dell'impianto, che comprende il costo delle strutture di supporto, dei moduli fotovoltaici, dei motori per la movimentazione dei sistemi con inseguimento solare, dei cavi di connessione, degli inverter dei sistemi di elevazione e i costi per il personale sia professionale che addetto ai lavori di installazione;



- OPEX che riguarda i costi sostenuti ogni anno per il funzionamento e la manutenzione dell'impianto, dunque, i costi del personale addetto alla gestione, i costi per i lavori di manutenzione e pulizia dei moduli, costi di riparazione etc.

L' LCOE [ $\text{€ MWh}^{-1}$ ] esprime la tariffa elettrica necessaria a cui vendere l'energia elettrica generata dall'impianto per recuperare tutti i costi di una centrale di generazione durante la vita economica presunta della stessa, includendo un rendimento economico pari al tasso di sconto ed è calcolato secondo l'equazione 9:

$$LCOE_{AV} = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^N OPEX * (1 + i)^{-t} - R_n}{\sum_{t=1}^N E_{AV} * (1 + i)^{-t}} \quad (\text{Eq. 9})$$

Dove: *CAPEX* esprime il totale dei costi sostenuti per la costruzione e l'installazione dell'impianto AV, *OPEX* esprime l'ammontare dei costi sostenuti annualmente per la manutenzione e il mantenimento dell'operatività dell'impianto;  $E_{AV}$  è l'energia generata dall'intero sistema AV nell'arco di un anno;  $R_n$  è il valore residuo dell'impianto al termine della vita economica dell'impianto AV;  $i$  è il tasso di sconto;  $N$  è la durata della vita economica del bene espressa in anni;  $t$  è l'anno di vita dell'impianto a cui costi di mantenimento ed energia generata sono riferiti.

Un esempio di calcolo di LCOE è stato proposto da Agostini *et al.* (2021) per un sistema AV biassiale con le stesse caratteristiche dell'impianto installato a Monticelli (PC), utilizzato nel progetto Agrivolt-ER.



## 3. Bibliografia

- Agostini, A., Colauzzi, M., Amaducci, S., 2021. Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment. *Applied Energy* 281. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116102>
- Ahmed, M.S., Khan, M. Rezwana, Haque, A., Khan, M. Ryyan, 2022. Agrivoltaics analysis in a techno-economic framework: Understanding why agrivoltaics on rice will always be profitable. *Applied Energy* 323, 119560. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119560>
- Amaducci, S., Yin, X., Colauzzi, M., 2018. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied Energy* 220, 545–561. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.081>
- Asa'a, S., Reher, T., Rongé, J., Diels, J., Poortmans, J., Radhakrishnan, H.S., Van Der Heide, A., Van De Poel, B., Daenen, M., 2024. A multidisciplinary view on agrivoltaics: Future of energy and agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 200, 114515. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114515>
- Bellone, Y., Croci, M., Impollonia, G., Nik Zad, A., Colauzzi, M., Campana, P.E., Amaducci, S., 2024. Simulation-Based Decision Support for Agrivoltaic Systems. *Applied Energy* 369, 123490. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123490>
- Campana, P.E., Stridh, B., Amaducci, S., Colauzzi, M., 2021. Optimisation of vertically mounted agrivoltaic systems. *Journal of Cleaner Production* 325. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129091>
- Capellán-Pérez, I., De Castro, C., Arto, I., 2017. Assessing vulnerabilities and limits in the transition to renewable energies: Land requirements under 100% solar energy scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77, 760–782. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.137>
- Dinesh, H., Pearce, J.M., 2016. The potential of agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54, 299–308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>
- 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>
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., Ferard, Y., 2011. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy* 36, 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
- Elamri, Y., Cheviron, 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>



- Garrod, A., Hussain, S.N., Ghosh, A., 2024. The technical and economic potential for crop based agrivoltaics in the United Kingdom. *Solar Energy* 277, 112744. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112744>
- Gomez-Casanovas, N., Mwebaze, P., Khanna, M., Branham, B., Time, A., DeLucia, E.H., Bernacchi, C.J., Knapp, A.K., Hoque, M.J., Du, X., Blanc-Betes, E., Barron-Gafford, G.A., Peng, B., Guan, K., Macknick, J., Miao, R., Miljkovic, N., 2023. Knowns, uncertainties, and challenges in agrivoltaics to sustainably intensify energy and food production. *Cell Reports Physical Science* 4, 101518. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2023.101518>
- Ko, J., Cho, J., Choi, J., Yoon, C.-Y., An, K.-N., Ban, J.-O., Kim, D.-K., 2021. Simulation of Crop Yields Grown under Agro-Photovoltaic Panels: A Case Study in Chonnam Province, South Korea. *Energies* 14, 8463. <https://doi.org/10.3390/en14248463>
- Lee, S., Lee, J., Jeong, Y., Kim, D., Seo, B., Seo, Y., Kim, T., Choi, W., 2023. Agrivoltaic system designing for sustainability and smart farming: Agronomic aspects and design criteria with safety assessment. *Applied Energy* 341, 121130. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121130>
- Lu, S.M., Zainali, S., Stridh, B., Avelin, A., Amaducci, S., Colauzzi, M., Campana, P.E., 2022. Photosynthetically active radiation decomposition models for agrivoltaic systems applications. *Solar Energy* 244, 536–549. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.046>
- Magarelli, A., Mazzeo, A., Ferrara, G., 2024. Fruit Crop Species with Agrivoltaic Systems: A Critical Review. *Agronomy* 14, 722. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040722>
- MiTE, 2022. Linee Guida in materia di Impianti Agrivoltaici. Ministero della Transizione Ecologica MiTE, Roma, Italia.
- Potenza, E., Croci, M., Colauzzi, M., Amaducci, S., 2022. Agrivoltaic System and Modelling Simulation: A Case Study of Soybean (*Glycine max* L.) in Italy. *Horticulturae* 8. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8121160>
- Reher, T., Lavaert, C., Willockx, B., Huyghe, Y., Bisschop, J., Martens, J.A., Diels, J., Cappelle, J., Van De Poel, B., 2024. Potential of sugar beet (*Beta vulgaris*) and wheat (*Triticum aestivum*) production in vertical bifacial, tracked, or elevated agrivoltaic systems in Belgium. *Applied Energy* 359, 122679. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122679>
- Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Obergfell, T., Bopp, G., Reise, C., Braun, C., Weselek, A., Bauerle, A., Högy, P., Goetzberger, A., Weber, E., 2020. Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Applied Energy* 265, 114737. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737>
- Sturchio, M.A., Macknick, J.E., Barron-Gafford, G.A., Chen, A., Alderfer, C., Condon, K., Hajek, O.L., Miller, B., Pauletto, B., Siggers, J.A., Slette, I.J., Knapp, A.K., 2022. Grassland productivity responds unexpectedly to dynamic light and soil water



environments induced by photovoltaic arrays. *Ecosphere* 13.  
<https://doi.org/10.1002/ecs2.4334>

Svanera, L., Amaducci, S., Colauzzi, M., Di Francia, G., Ghidesi, G., Guastella, S., Liciotti, C., Pellegrino, M., Potenza, E., Pugliese, S., Reboldi, A., Scognamiglio, A., 2023. Sistemi agrivoltaici - Integrazione di attività agricole e impianti fotovoltaici. PRASSI DI RIFERIMENTO UNI/PdR 148:2023.

Tonita, E.M., Russell, A.C.J., Valdivia, C.E., Hinzer, K., 2023. Optimal ground coverage ratios for tracked, fixed-tilt, and vertical photovoltaic systems for latitudes up to 75°N. *Solar Energy* 258, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.04.038>

Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., Schindele, S., Bopp, G., Ehmann, A., Weselek, A., Högy, P., Obergfell, T., 2021. Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110694>

Valle, B., Simonneau, T., Sourd, F., Pechier, P., Hamard, P., Frisson, T., Ryckewaert, M., Christophe, A., 2017. Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops. *Applied Energy* 206, 1495–1507. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.113>

Warmann, E., Jenerette, G.D., Barron-Gafford, G.A., 2024. Agrivoltaic system design tools for managing trade-offs between energy production, crop productivity and water consumption. *Environ. Res. Lett.* 19, 034046. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad2ab8>

Willockx, B., Cappelle, J., 2022. A comparison study of the performance of vertical vs single axis tracking bifacial agrivoltaic systems in Belgium, in: 2022 IEEE 49th Photovoltaics Specialists Conference (PVSC). IEEE, pp. 1162–1162. <https://doi.org/10.1109/PVSC48317.2022.9938956>

Willockx, B., Lavaert, C., Cappelle, J., 2022. Geospatial assessment of elevated agrivoltaics on arable land in Europe to highlight the implications on design, land use and economic level. *Energy Reports* 8, 8736–8751. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.076>

Zainali, S., Lindahl, J., Lindén, J., Stridh, B., 2023. LCOE distribution of PV for single-family dwellings in Sweden. *Energy Reports* 10, 1951–1967. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.08.042>

Zhang, S., Gong, J., Xiao, C., Yang, X., Li, X., Zhang, Z., Song, L., Zhang, W., Dong, X., Hu, Y., 2024. *Bupleurum chinense* and *Medicago sativa* sustain their growth in agrophotovoltaic systems by regulating photosynthetic mechanisms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 189, 114024. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114024>

Zheng, J., Meng, S., Zhang, X., Zhao, H., Ning, X., Chen, F., Abaker Omer, A.A., Ingenhoff, J., Liu, W., 2021. Increasing the comprehensive economic benefits of farmland with Even-lighting Agrivoltaic Systems. *PLoS ONE* 16, e0254482. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254482>