



Soggetto promotore: **Gruppo Marseglia**

Soggetto proponente: **Masserie Salentine S.r.l. Società Agricola** (componente agricola)

Soggetto proponente: **Energetica Salentina S.r.l.** (componente fotovoltaica)

IMPIANTO AGRIVOLTAICO

SITO NEI COMUNI DI NARDÒ, SALICE SALENTINO E VEGLIE
IN PROVINCIA DI LECCE

Valutazione di Impatto Ambientale

(artt. 23-24-25 del D.Lgs. 152/2006)

Commissione Tecnica PNRR-PNIEC

(art. 17 del D.L. 77/2021, convertito in L. 108/2021)

Idea progettuale e coordinamento generale: **AG Advisory S.r.l.**

Paesaggio e supervisione generale: **CRETA S.r.l.**

Programma di ricerca "Paesaggi del Futuro", Responsabili scientifici: **Prof. Arch. Paolo Mellano, Prof.ssa Arch. Elena Vigliocco** (Politecnico di Torino)

Programma di ricerca "Ottimizzazione dell'agrivoltaico con oliveti a siepe: analisi numerico matematica", Responsabili scientifici: **PhD Cristiano Tamborrino** (Università degli Studi di Bari), **PhD Elisa Gatto** (Biologa ambientale)

Postproduzione: **Galante – Menichini Architetti per AG Advisory S.r.l.**

Supporto grafico: **Heriscape Progetti S.r.l. STP per AG Advisory S.r.l.**

Progettisti:

Progetto agricolo: **Prof. Massimo Monteleone** (Università degli Studi di Foggia)

Dott. Agr. Barnaba Marinosci

Progetto impianto fotovoltaico: **Ing. Andrea D'Ovidio**

Progetto strutture: **Ing. Giovanni Errico**

Progetto opere di connessione: **Ing. Andrea D'Ovidio**

Contributi specialistici:

Acustica: **Ing. Massimo Rah**

Agronomia: **Dott. Agr. Barnaba Marinosci**

Approvvigionamento idrico: **Geol. Massimiliano Brandi**

Archeologia: **Dott.ssa Caterina Polito**

Clima e PMA: **Dott.ssa Elisa Gatto**

Fauna: **Dott. Giacomo Marzano**

Geologia: **Geol. Pietro Pepe**

Idraulica: **Ing. Luigi Fanelli**

Rilievi: **Studio Tafuro**

Risparmio idrico: **Netafim Italia S.r.l.**

Vegetazione e microclima: **Dott. Leonardo Beccarisi**

Cartella

VIA_2/

Identificatore:

0_PAGRVLT05_A

Programma di Ricerca: **Ottimizzazione
dell'agrivoltaico con oliveti a siepe -
Analisi numerico matematica**

Descrizione Ottimizzazione dell'agrivoltaico con oliveti a siepe: Analisi numerico matematica

Nome del file:

0_PAGRVLT05_A.pdf

Tipologia

Relazione

Scala

-

Autori elaborato: **Dott. Cristiano Tamborrino**

Dott. Ssa Elisa Gatto

Rev.

Data

Descrizione

00

18/03/24

Prima emissione

01

02

Spazio riservato agli Enti:



OTTIMIZZAZIONE DELL'AGRIVOLTAICO CON OLIVETI A SIEPE: ANALISI NUMERICO MATEMATICA

"BORGO MONTERUGA"

Progetto di un impianto agrivoltaico da realizzarsi nei comuni di Nardò, Salice Salentino e Veglie in provincia di Lecce

CONTENUTI:

L'obiettivo del presente elaborato è **identificare la configurazione spaziale ottimale per l'impianto** "Borgo Monteruga" (nei comuni di Nardò, Salice Salentino e Veglie - località Borgo Monteruga, Provincia di Lecce, Puglia) con l'intento di potenziare la **sinergia tra produzione agricola ed energetica**.

Mediante simulazioni numerico matematiche, è stata esaminata l'influenza della distanza tra i pannelli fotovoltaici e l'altezza delle colture olivicole, ponendo un'attenzione particolare all'ombreggiamento che le stesse possono produrre sui pannelli.

Tra gli scenari investigati è emerso che le distanze interasse di 10,6 m e 12 m rappresentano le migliori soluzioni per bilanciare produzione agricola ed energetica, con 12 m che mostra prestazioni leggermente superiori.

Sono stati condotti studi microclimatici per affinare la scelta della configurazione ottimale del progetto (vedi relazione *Ottimizzazione dell'agrivoltaico con oliveti a siepe_analisi modellistica microclimatica*).

A cura di:

Dott. Cristiano Tamborrino
Dott.ssa Elisa Gatto, PhD

Sommario

Riassunto:.....	2
Crediti	3
Acronimi	3
1. Introduzione:	4
2. Materiali e Metodi	4
2.1. Processo operativo per la definizione della configurazione ottimale	4
2.2. L'analisi matematica	6
3. Il caso di studio	17
4. Risultati e Discussione	18
4.1. Variazione dell'angolo di inclinazione β nei vari scenari	18
4.2. LER.....	20
5. Conclusioni	22
6. Bibliografia	24

Riassunto:

Nel presente studio è stata condotta un'analisi simulativa approfondita per **garantire una sinergia massima tra produzione agricola ed energetica ed evitare l'ombreggiamento delle colture di olivo a siepe sui pannelli fotovoltaici nel progetto di agrivoltaico "Borgo Monteruga"** (che ricade nei comuni di Nardò, Veglie, Salice Salentino, in località Borgo Monteruga, provincia di Lecce, Puglia). Oltre a definire la distanza interasse ottimale, il presente studio fornisce informazioni sull'altezza ottimale delle colture e sul meccanismo di inseguimento solare.

Attraverso una metodologia basata sulla geometria delle colture e sulla conoscenza dell'irraggiamento solare, sono state analizzate diverse configurazioni spaziali e geometriche: 3 distanze interasse (8m, 10.6 m e 12m) e 3 altezze delle siepi (2.3m, 2.6m e 3 m). I risultati chiave sono qui riassunti:

- **Ombreggiamento:** colture di altezza superiore a 2,3m possono ritardare l'inseguimento solare dei pannelli, riducendo così l'irraggiamento diretto.
- **Dinamica del tracciamento solare:** la presenza di ostruzioni (altezze maggiori di 2.3m) modificano la traiettoria di inseguimento solare, con un'angolazione iniziale rivolta verso l'alto per ridurre l'ombreggiamento.
- **Distanza interasse:** una distanza di 8 metri tra i pannelli riduce l'irraggiamento diretto, mentre a 12 metri si osserva un inseguimento solare ottimale. Le distanze ideali, che combinano un buon tasso di energia e resa (LER) e minori problemi di ombreggiamento, sono 10,6m e 12m, con prestazioni leggermente migliori per quest'ultima.
- **Valori di LER:** a distanze minori, il valore del LER aumenta, ma insorgono problemi di ombreggiamento sui pannelli. A 10.6 metri, si osserva il LER ottimale.
- **Indagini microclimatiche:** ulteriori indagini microclimatiche hanno affinato la scelta tra 10.6m e 12m sulla base di aspetti legati al microclima, al comfort termico e all'attuazione degli obiettivi di sviluppo sostenibile che il progetto si prefigge (vedi relazione *"Ottimizzazione dell'agrivoltaico con oliveti a siepe: analisi modellistica microclimatica"*).

I risultati scientifici di tale analisi saranno presentati alla conferenza internazionale **AgriVoltaics World Conference 2024 (oral presentation)** e sottomessi su una rivista scientifica internazionale *peer-reviewed*.

Crediti

Lavoro realizzato da:

PhD Cristiano Tamborrino (*Ricercatore in Analisi Numerica presso l'Università degli Studi di Bari*):
analisi matematica

PhD Elisa Gatto (*Biologa ambientale*): revisione, redazione e rielaborazione testo

Acronimi

$\beta_{\max}$: angolo massimo di inclinazione

Et al.: et alii (e altri)

LER: Land Equivalent Ratio

CFD: Computational Fluid Dynamics

H: altezza

1. Introduzione:

Il progetto agrivoltaico "Masserie Salentine", sito in località Borgo Monteruga (Veglie, LE), è ancorato a un modello di innovazione produttiva che coniuga le più recenti e sofisticate tecnologie nel campo dell'energia rinnovabile con le esigenze specifiche della filiera agroindustriale pugliese. La combinazione di pannelli fotovoltaici elevati da terra alternati a filari di olivi a siepe della varietà FS-17 rappresenta una soluzione strategica non solo per migliorare l'efficienza produttiva, ma anche per affrontare la crisi provocata dalla diffusione della *Xylella fastidiosa* che ha profondamente alterato l'ecosistema agricolo della regione.

Un elemento critico che riveste un ruolo centrale nello studio e nella successiva implementazione del progetto è il duplice obiettivo di massimizzare la produttività, sia nel settore agricolo che in quello energetico. Ciò comporta una gestione accurata e una strategica disposizione dei pannelli fotovoltaici per evitare l'ombreggiamento che potrebbe compromettere la funzionalità ottimale di queste due componenti integrative.

Nel contesto descritto, il presente elaborato è focalizzato alla determinazione della distanza ottimale tra gli assi dei tracker sulla base di un'analisi matematica che valuta l'incidenza dell'ombreggiamento sui pannelli. Tale analisi pone le basi per la creazione di un sistema in cui la pratica agricola e la generazione di energia rinnovabile coesistano in simbiosi, supportandosi reciprocamente per il benessere collettivo e la sostenibilità ambientale a lungo termine, senza interferenze dannose.

2. Materiali e Metodi

2.1. Processo operativo per la definizione della configurazione ottimale

Il processo operativo adottato per la selezione della configurazione ottimale dell'impianto agrivoltaico è stato caratterizzato da una serie di fasi di studio e analisi, ognuna delle quali ha contribuito a indirizzare le scelte progettuali (Figura 1).

- **Analisi preliminare e review scientifica:** questa fase iniziale ha implicato un'indagine approfondita degli standard di mercato correnti per i tracker solari, con particolare attenzione a quei sistemi che non generano costi aggiuntivi nell'implementazione. Abbiamo valutato la compatibilità di diversi tracker con l'olivicoltura intensiva, integrando

le linee guida e le "buone pratiche" suggerite dal Fraunhofer Institute¹. Quest'ultimo ha svolto un ruolo pionieristico, conducendo ricerche avanzate che hanno significativamente influenzato le normative e la pianificazione degli impianti agrivoltaici e hanno contribuito a potenziare la produttività agricola, minimizzare l'impronta di carbonio e favorire una sostenibilità ambientale a lungo termine negli impianti.

- **Modellazione matematica e definizione degli scenari:** tale fase operativa, analizzata nel dettaglio nelle sezioni che seguono, ci ha permesso di calcolare l'irradianza sui pannelli solari, considerando specificatamente i fattori di ombreggiamento. La modellazione ha considerato alcuni scenari caratterizzati da variabili spaziali e geometriche differenti. In questa fase è stato calcolato il *Land Equivalent Ratio* LER per le diverse configurazioni considerate. Questo indice è essenziale per valutare l'efficienza dell'uso del terreno in sistemi agricoli integrati come l'agrivoltaico.
- **Modellazione microclimatica:** gli scenari analizzati nell'analisi matematica sono stati sottoposti a modellazione microclimatica con un modello di fluidodinamica computazionale (CFD) che ha permesso di verificare l'efficienza colturale e la sostenibilità ambientale delle varie configurazioni analizzate (vedi relazione *Ottimizzazione dell'agrivoltaico con oliveti a siepe: analisi modellistica microclimatica*).

¹ Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE

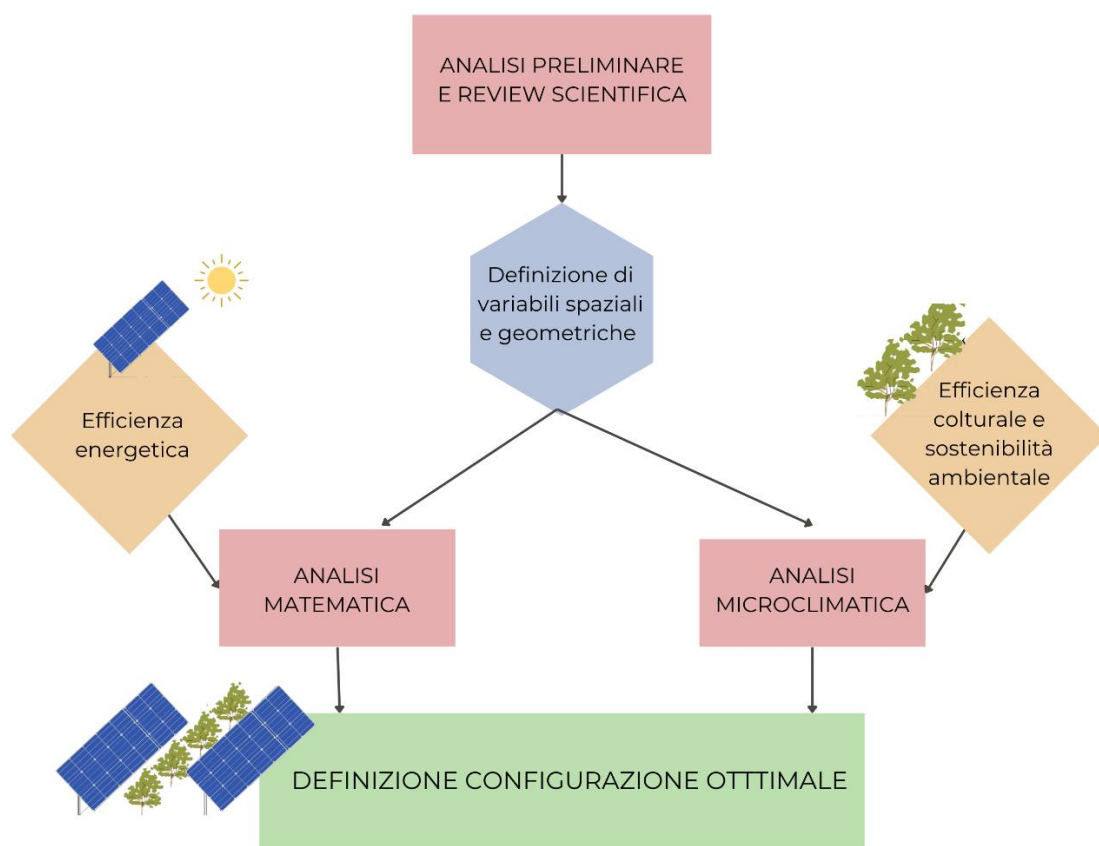


Figura 1. Processo operativo che ha condotto alla definizione della configurazione ottimale dell'impianto agrivoltaico "Masserie Salentine".

Questo processo operativo, articolato e basato su dati scientifici validati dalla letteratura esistente, ha garantito una selezione del layout non solo teoricamente solida ma anche praticamente applicabile e ottimizzata per l'integrazione di impianti fotovoltaici con oliveti a siepe.

2.2. L'analisi matematica

Mediante un'analisi simulativa approfondita, è stato esaminato l'irraggiamento solare all'interno dell'impianto agrivoltaico delineato, e sono stati studiati gli effetti che l'ombreggiamento dell'uliveto a siepe interfilare può avere sui pannelli fotovoltaici. Da questa indagine, è emersa una configurazione geometrica ottimale che consente di incorporare le colture preservando la capacità di assorbimento dell'energia solare dell'impianto.

Per l'analisi è stato considerato un terreno di area pari ad un ettaro.

I moduli fotovoltaici considerati, impiegati nel progetto in esame (Figura 2), sono sistemi ad inseguimento che ruotano su un asse orizzontale in conformità con il movimento giornaliero del

Sole, con file azionate indipendentemente e sistema di backtracking. L'ampiezza di questo movimento è limitata entro un angolo massimo specificato (β_{max}), che varia a seconda del produttore. Valori comuni per β_{max} sono pari a $\pm 60^\circ$ (<https://www.gsolarsteel.com/>). Nel presente studio l'angolo massimo considerato è $\beta_{max} = \pm 55^\circ$. I pannelli sono ad un'altezza media da terra maggiore di 2.10m (Figura 1).

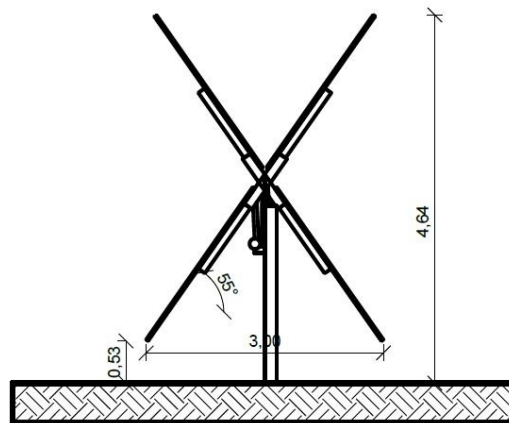


Figura 2: Caratteristiche del tracker monoassiale impiegato nel progetto di "Masserie Salentine".

I calcoli sono stati condotti seguendo la formulazione matematica in Barbòn et al., 2023 e Duffle & Beckman 2006. Tali formulazioni sono riproposte nel lavoro di Casares de la Torre et al., 2022, che hanno anch'essi utilizzato come riferimento l'angolo di inseguimento e l'angolo di retroazione del nostro pannello fotovoltaico. Di seguito sono riportate le equazioni pertinenti utilizzate, sottoposte a rianalisi e adattate al nostro modello.

È stata svolta un'analisi comparativa tra diverse configurazioni spaziali agrivoltaiche per evidenziarne i punti di forza e di debolezza e per supportare la scelta più vantaggiosa da un punto di vista economico, ambientale e sociale.

Prima di procedere, è fondamentale comprendere alcuni aspetti geometrici relativi alla posizione del sole da un punto di osservazione specifico sulla Terra. Quando si osserva il sole da una qualsiasi posizione terrestre, l'obiettivo è determinare la sua posizione usando un sistema di coordinate che si riferisce al punto di osservazione specifico, non al centro della Terra. Il sistema di coordinate tradizionalmente usato sulla superficie terrestre comprende una linea verticale (direzione verso l'alto) e un piano orizzontale, che a sua volta comprende un asse che va da nord a sud e un altro da est a ovest. All'interno di questo sistema, la posizione del sole è definita da

due angoli specifici: l'angolo di altitudine solare e l'angolo zenitale solare, come illustrato nella Figura 3.

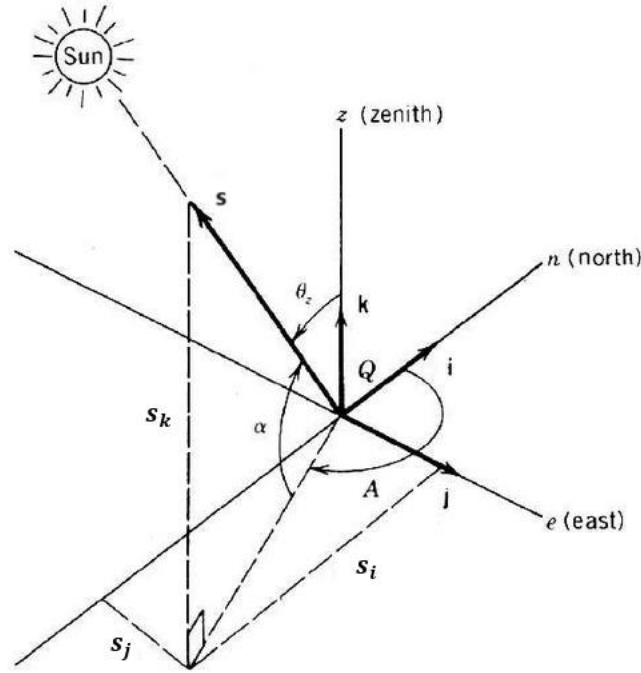


Figura 3: Sistema di coordinate sulla superficie terrestre per un osservatore al punto Q. Viene mostrato l'angolo azimutale solare A, l'angolo di altitudine solare α e l'angolo zenitale solare θ_z relativi a un raggio solare centrale lungo il vettore direzionale (Fonte: <http://www.powerfromthesun.net/book.html>).

Per esaminare l'interazione ombreggiante tra i moduli solari e le strategie di inseguimento o *backtracking* proposte in questa ricerca, è essenziale effettuare una simulazione che mostri come la radiazione solare interagisce con l'area in esame. Questa simulazione si avvale di descrizioni vettoriali che localizzano il sole nel cielo e definiscono l'orientamento dei moduli solari.

In questo scenario, i vettori unitari $\hat{i}$, $\hat{j}$ e $\hat{k}$ sono impiegati per rappresentare gli assi Ox, Oy e Oz del sistema di riferimento orizzontale. Il vettore solare, indicato come $\vec{s}$, è delineato nell'Equazione 1. In questa equazione, $\hat{j}$ indica la latitudine del luogo, $\Omega = \pi/12$ rad/h rappresenta la velocità angolare di rotazione della Terra, τ indica l'ora solare e δ sta per la declinazione. Questo vettore solare fornisce le informazioni cruciali per l'analisi. La formula ben stabilita che rappresenta questo vettore è riportata in Barbòn et al., (2023) e Duffie & Beckman (2006).

$$\begin{aligned}\hat{s} &= s_x \hat{i} + s_y \hat{j} + s_z \hat{k} \\ &= (\sin \Omega \tau \cdot \cos \delta) \hat{i} + (\cos \Omega \tau \cdot \cos \delta \cdot \sin \psi - \sin \delta \cdot \cos \psi) \hat{j} + (\cos \Omega \tau \cdot \cos \delta \cdot \cos \psi + \sin \delta \cdot \sin \psi) \hat{k}\end{aligned}$$

Equazione 1

dove secondo il modello di Spencer (1971), la declinazione δ dipende dal giorno giuliano d_j (Klein, 1977), come indicato dalle seguenti equazioni:

$$\begin{aligned}\delta(\text{rad}) = & [0.006918 \cdot 0.399912 \cos(\Gamma) + 0.070257 \sin(\Gamma)] \\ & - [0.006758 \cos(2\Gamma) + 0.000907 \sin(2\Gamma)] - [0.002697 \cos(3\Gamma) + 0.00148 \sin(3\Gamma)] \\ \Gamma(\text{rad}) = & \frac{2\pi}{365} \cdot (d_j - 1)\end{aligned}$$

Equazione 2

Tabella 1: Giorni medi raccomandati per i mesi e valori di d_j per i mesi (Klein, 1977)

Month	d_j for ith day of Month	For Average Day of Month	
		Date	d_j
January	i	17	17
February	31 + i	16	47
March	59 + i	16	75
April	90 + i	15	105
May	120 + i	15	135
June	151 + i	11	162
July	181 + i	17	198
August	212 + i	16	228
September	243 + i	15	258
October	273 + i	15	288
November	304 + i	14	318
December	334 + i	10	344

Per iniziare, si prende in considerazione un impianto fotovoltaico dotato di inseguitori solari monossiali orizzontali Nord-Sud come riferimento. Solitamente, queste installazioni utilizzano un inseguimento solare astronomico che mira costantemente a ridurre al minimo l'angolo di incidenza solare (rappresentato come θ) che si forma tra il vettore solare $\vec{s}$ e il vettore normale ai moduli $\vec{n}$. Questa condizione è espressa matematicamente attraverso l'Equazione 3:

$$\vec{n} = \frac{s_x}{\sqrt{s_x^2 + s_z^2}} \cdot \vec{i} + \frac{s_z}{\sqrt{s_x^2 + s_z^2}} \cdot \vec{k}$$

Equazione 3

In questa equazione, $\vec{n}$ e $\vec{s}$ sono vettori, mentre s_x e s_z rappresentano le loro rispettive componenti.

La Figura 4 mostra la proiezione dell'impianto fotovoltaico sul piano Oxz. Da questa figura, l'elevazione solare apparente, α , può essere definita come l'angolo formato dalla proiezione del vettore solare, $\vec{s}$, nel piano Oxz con l'asse Ox. Secondo questa definizione, α sarà dato dall'Equazione 4:

$$\alpha = \arctan \left(\frac{s_z}{|s_x|} \right)$$

Equazione 4

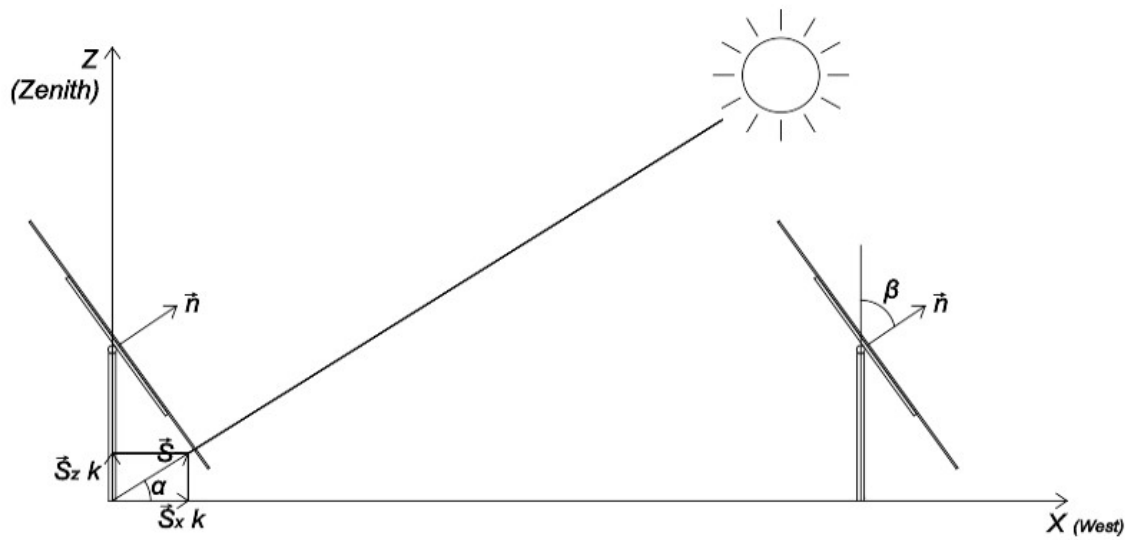


Figura 4: proiezione dell'impianto fotovoltaico sul piano Oxz

Dall'elevazione solare apparente, l'inclinazione dei moduli in ogni istante è data dall'Equazione 5:

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha$$

Equazione 5

In queste equazioni, α rappresenta l'elevazione solare apparente, s_x e s_z denotano le componenti del vettore solare $\vec{s}$, e β indica l'orientamento dei moduli rispetto alla direzione solare. L'obiettivo è minimizzare l'inter-ombreggiamento (Pigueiras & Narvarte, 2011; Fernandez-Ahumada et al., 2020a; Fernandez-Ahumada et al., 2020b), il che necessita che i moduli solari si avvicinino a una

posizione orizzontale all'inizio e alla fine di ogni giornata. La Figura 5 fornisce una rappresentazione visiva di due file adiacenti di moduli in uno scenario ideale in cui non è presente inter-ombreggiamento. Per chiarezza, abbiamo raffigurato il percorso circolare tracciato dalle estremità dei moduli fotovoltaici durante il loro movimento di inseguimento solare.

Dalla Figura 5, possiamo definire un limite di altezza solare apparente denotato come α_{lim} , che corrisponde alla tangente comune condivisa da entrambi i cerchi. Pertanto, può essere determinato utilizzando l'Equazione 6.

$$\alpha_{lim} = \arcsin\left(\frac{l}{d}\right)$$

Equazione 6

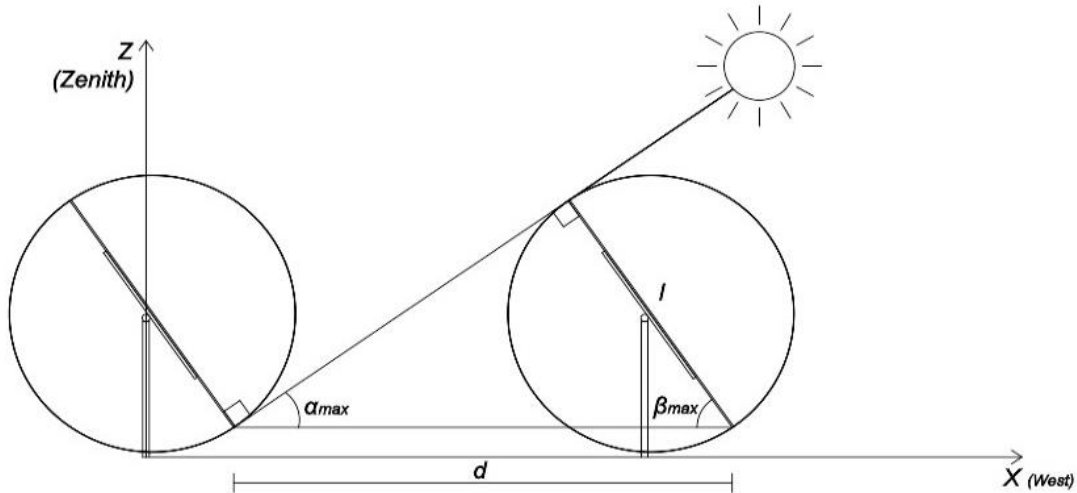


Figura 5: Situazione limite tra inseguimento astronomico e backtracking per un impianto fotovoltaico con inseguimento su un asse NeS.

Accanto a questo limite di altezza solare apparente, possiamo stabilire l'inclinazione limite β_{max} come l'angolo massimo in cui i pannelli possono essere inclinati senza che l'inseguimento astronomico risulti in inter-ombreggiamento, come descritto dall'Equazione 7. Entrambe queste misure dipendono da specifici fattori geometrici e astronomici, con fattori astronomici che si riferiscono a elementi celesti come la posizione del sole, gli angoli solari e gli eventi celesti che influenzano i fenomeni osservati.

$$\beta_{max} = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{l}{d}\right)$$

Equazione 7

Nessun ombreggiamento si verifica quando $\alpha \geq \alpha_{lim}$ e $\beta \leq \beta_{max}$, e l'angolo di inclinazione del pannello è determinato da: $\beta = \pi/2 - \alpha$. Quando $\alpha < \alpha_{lim}$ e $\beta > \beta_{max}$, il backtracking diventa imperativo per prevenire l'ombreggiamento tra i pannelli. Quando si utilizza il backtracking, l'angolo di inclinazione dei collettori, denotato come β , può essere determinato utilizzando l'Equazione 8, come illustrato nel lavoro di Casares de la Torre et al. (2022).

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha - 2 \arccos\left(\frac{d}{l} \sin \alpha\right)$$

Equazione 8

In questo studio, prendiamo in considerazione le seguenti variabili, riassunte nella Tabella 2:

Tabella 2: Variabili utilizzate nel seguente studio

Variable	Description
d	Distance between tracker axes.
l	Length of the solar panels.
h_c	Height of the vertical axis of the collector.
h_t	Height of trees.
l_t	Width of the tree canopy.

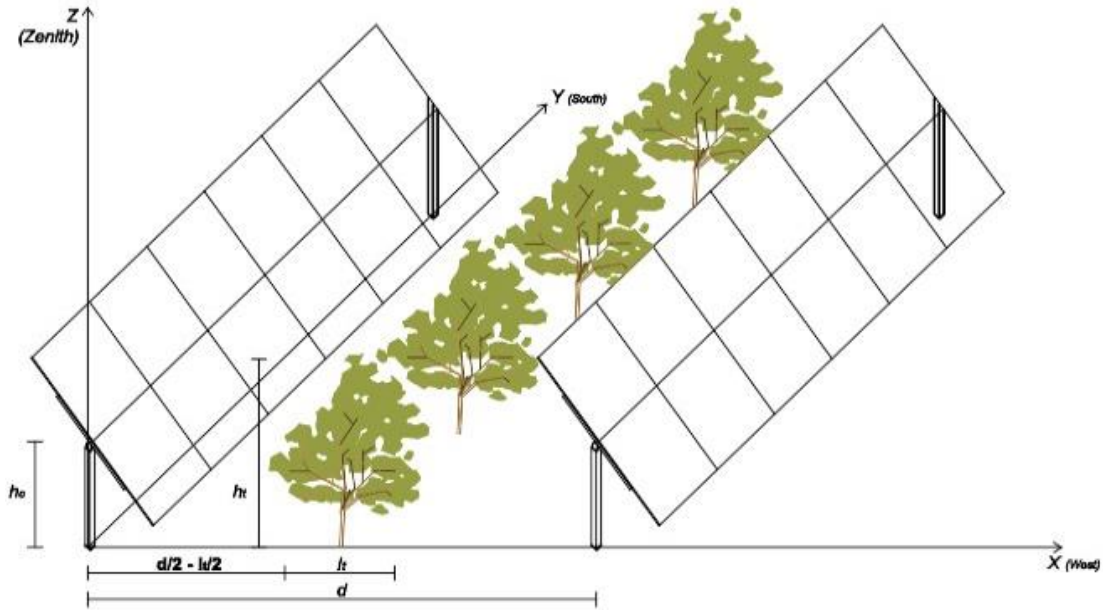


Figura 6: Rappresentazione di un impianto agrivoltaico con inseguimento su asse NS e colture di ulivo interfilari

Un tipico scenario in cui i raggi solari si intersecano ad un'altezza apparente inferiore ad $d \sin \beta$ è rappresentato nella Figura 7. Di conseguenza, in tali circostanze, il concetto di backtracking viene introdotto come mezzo per mitigare l'inter-ombreggiamento, inducendo un aggiustamento dell'orientamento dei pannelli verso un allineamento più orizzontale. In questa particolare configurazione, è degno di nota che i punti P e T, che corrispondono al raggio limite che passa attraverso le estremità dei collettori adiacenti, presentano coordinate all'interno del piano Oxz:

$$P \equiv \left(\frac{l}{2} \cos \beta, h_c + \frac{l}{2} \sin \beta \right), \text{ and } T \equiv \left(d \cdot \frac{l}{2} \cos \beta, h_c - \frac{l}{2} \sin \beta \right).$$

Il punto medio M tra l'asse del collettore solare è un punto fisso e invariabile con coordinate, $M \equiv \left(\frac{d}{2}, h_c \right)$.

Seguendo questo ragionamento, si può dedurre che esiste una zona specifica dove i raggi solari diretti non colpiscono mai i moduli solari in nessuna circostanza. La Figura 7 illustra visivamente la rappresentazione di questa zona all'interno del piano Oxz. Di conseguenza, qualsiasi coltura situata all'interno di questa regione designata, pur rimanendo entro i suoi confini stabiliti, non proietterebbe ombre sui pannelli. Quindi, non avrebbe alcun impatto sulle strategie di tracking o backtracking impiegate dall'installazione fotovoltaica precedente. È importante sottolineare di

tenere in considerazione il valore limite dell'inclinazione meccanica, β_{max} , quando si considera il calcolo dell'equazione precedente.

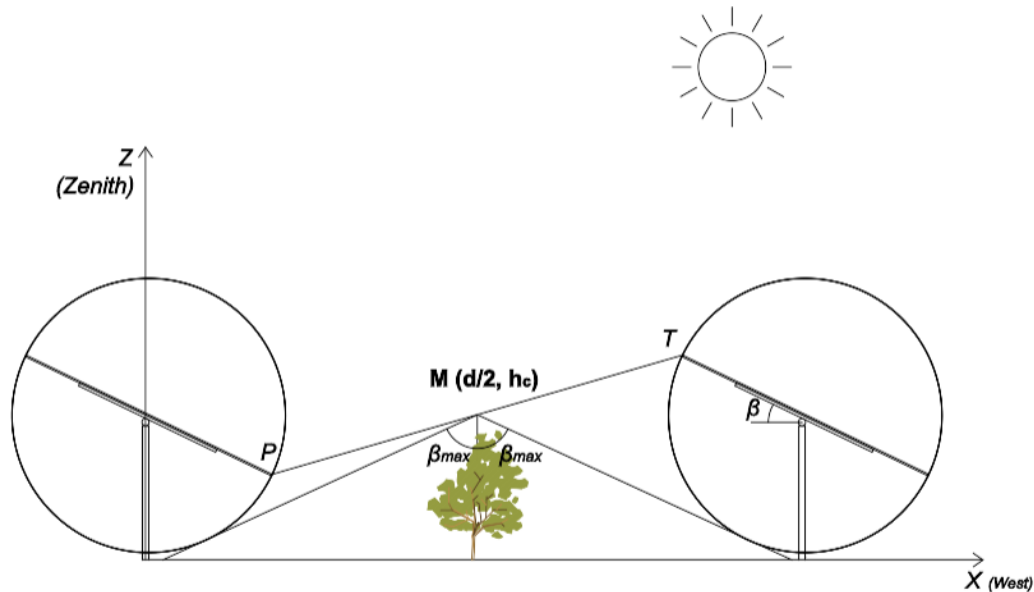


Figura 7: Rappresentazione della zona priva di radiazione solare diretta in un impianto fotovoltaico con inseguimento su asse NS.

Nella sezione successiva, sfruttiamo i risultati del lavoro di Casares de la Torre et al. (2022) che ha esaminato la potenziale occorrenza di ombreggiamento quando le colture si estendono oltre l'area non ombreggiata. È importante notare che la strategia di tracciamento solare che stiamo impiegando è già stata pubblicata ed è attualmente in uso. Questa strategia serve a mitigare l'ombreggiamento parziale dei collettori, garantendo un apporto continuo di irraggiamento diretto. Inoltre, i calcoli che abbiamo utilizzato sono in fase di revisione come parte del nostro lavoro scientifico che si occupa specificamente dell'integrazione tra coltivazione di piante e sistemi fotovoltaici nella regione della Puglia, concentrandosi sulle strategie ottimali per questo contesto.

La Figura 8 rappresenta l'impianto fotovoltaico con inseguitori solari monoasse orizzontali N-S e una coltura di dimensioni l_t (larghezza) e h_t (altezza), centrata alla distanza media tra due file consecutive di pannelli fotovoltaici. In questa figura, secondo la strategia di tracciamento/*backtracking* descritta in precedenza, i pannelli sono inclinati ad un angolo β che sarà dato dall'Equazione 5, nel caso di tracciamento astronomico, o dall'Equazione 8, nel caso di *backtracking*.

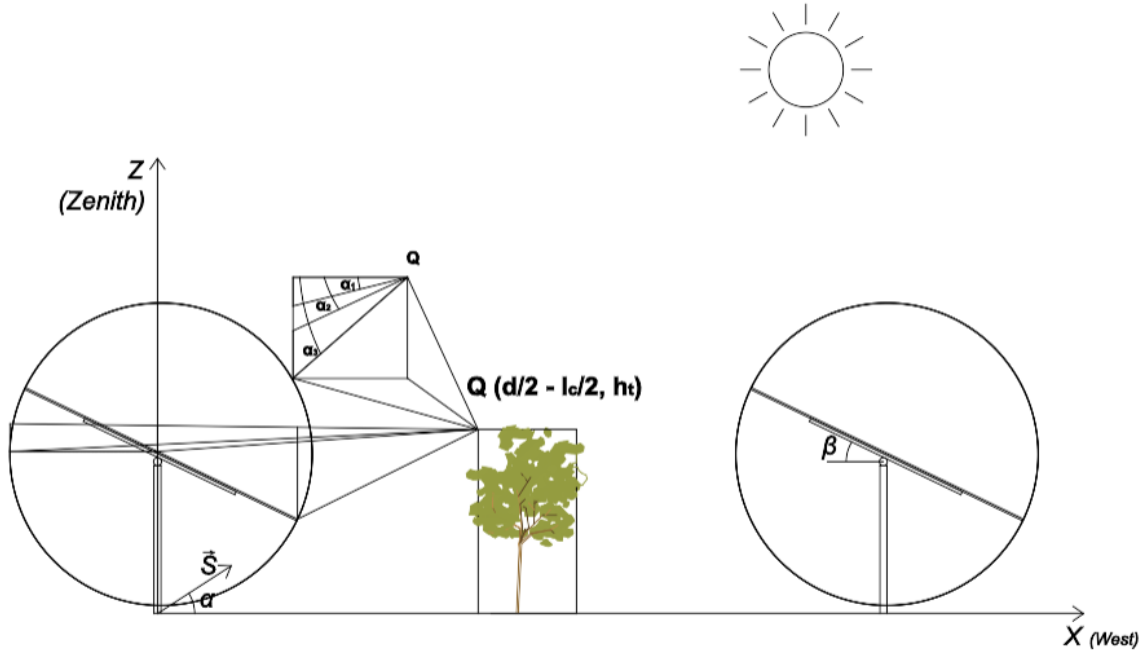


Figura 8: Rappresentazione geometrica dei limiti angolari α_1 (modulo solare completamente in ombra), α_2 (modulo solare parzialmente in ombra) e α_3 (modulo solare senza ombra) per lo studio dell'ombreggiamento delle colture sui pannelli PV.

Attraverso l'analisi delle ombre delle coltivazioni sui pannelli, viene proposto un algoritmo di inseguimento/retroinseguimento. A tale scopo, viene fornito un valore corretto d'inclinazione dei pannelli per evitare le ombre delle colture sui pannelli. Calcoliamo l'inclinazione corretta utilizzando la considerazione in Casares de la Torre et al. (2022), dove gli autori considerano tre possibili angoli di ombreggiatura, α_1 , α_2 , α_3 , che riguardano il vertice superiore sinistro Q dell'albero. Nel nostro algoritmo abbiamo considerato:

- $\alpha_1 = \arctan\left(2 \frac{h_t - h_c}{d - l_c + l \cdot \cos \beta}\right)$ quando l'intero modulo è ombreggiato dalla coltivazione.
- $\alpha_2 = \arctan\left(2 \frac{h_t - h_c}{d \cdot l_c}\right)$ quando il modulo è parzialmente ombreggiato.
- $\alpha_3 = \arctan\left(\frac{2h_t - 2h_c + l \cdot \sin \beta}{d - l_c - l \cdot \cos \beta}\right)$ quando il modulo non è ombreggiato.

Questi angoli delimitatori definiscono quattro possibili intervalli da considerare nell'analisi dell'ombreggiamento delle colture sui pannelli:

- i) Se $0 < \alpha < \alpha_1$, il modulo deve rimanere in posizione orizzontale.
- ii) Se $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$, l'angolo corretto β_c viene dato dall'Equazione 9.

$$\beta_c = \frac{\pi}{2} - 2 \arcsin \left(\frac{2D}{l} \sin(\alpha_2 - \alpha) \right), \quad D = \sqrt{\left(\frac{d^2}{4} - \frac{l_t^2}{2} \right)^2 + (h_t - h_c)^2}$$

Equazione 9

iii) Se $\alpha_2 < \alpha < \alpha_3$, la correzione consente l'accesso uniforme della radiazione diretta a tutto il modulo.

$$\beta_c = \frac{\pi}{2} - 2 \arcsin \left(\frac{2D}{l} \sin(\alpha - \alpha_2) \right)$$

Equazione 10

iv) Se $\alpha > \alpha_3$, la coltivazione non ombreggerebbe i moduli.

Dopo aver sviluppato la metodologia di inseguimento/retroinseguimento per il sistema agrivoltaico, proseguiamo con **l'indagine sulla produzione energetica di questo sistema**, considerando l'irraggiamento incidente sui moduli, indicato come I . Questa valutazione considera tre modelli radiativi, tra cui il modello isotropico di Liu-Jordan (1963). Questo modello particolare è stato validato in diverse località geografiche ed è riconosciuto a livello mondiale (Makhdoomi & Askarzadeh, 2021; Zhu et al., 2020; Conceição et al., 2019). Di conseguenza, è ragionevole utilizzare questo modello semplificato per ottenere risultati validi e affidabili. L'ipotesi di fondo di questo modello è che l'irraggiamento solare diffuso sia uniformemente distribuito su tutta la sfera celeste. In base a questo modello, l'irraggiamento solare, indicato come I , è calcolato sulla base dell'irraggiamento solare diretto (I_B) e diffuso (I_D) ricevuto su una superficie orizzontale utilizzando l'Equazione 10.

$$I = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \cdot I_B + \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \cdot I_D + \rho \cdot \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \cdot (I_B + I_D)$$

Equazione 11

L'irraggiamento solare incidente sui pannelli solari per 12 giorni rappresentativi secondo Klein (1977) è stato scaricato dal sito https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#MR. Dai dati sull'irraggiamento, è stata calcolata la radiazione solare per ciascuno di questi giorni rappresentativi ed è stata stimata la radiazione annuale incidente sul modulo.

3. Il caso di studio

L'area geografica presa in considerazione è la Puglia meridionale con coordinate geografiche latitudine: 40,35 e longitudine: 17,84. Le variabili fisse sono riassunte nella Tabella 3:

Tabella 3. Parametri del sistema

Parameter	Value
Tracker Axis Height (h_c)	2.6 meters
Panel Width (l)	5 meters
Tree Row Inter-Row Spacing	2.5 meters
Tree Row Width (l_t)	1.5 meters

L'indagine è stata condotta per diversi scenari caratterizzati da diverse variabili spaziali e geometriche: sono state considerate tre diverse distanze dell'asse del tracker (d): 8 m, 10,6 m e 12 metri. Per ciascuno di questi valori è stato analizzato il LER variando l'altezza dell'albero (h_t) in un intervallo tra 2,3 metri e 3 metri. In tutti gli scenari in esame, l'applicazione della metodologia sopra descritta ci ha permesso di **monitorare le variazioni giornaliere sia nelle posizioni dei moduli sia nell'irraggiamento che ricevono, tenendo conto delle caratteristiche geometriche della coltura.** Nella configurazione ideale di un sistema basato esclusivamente su pannelli solari, abbiamo calcolato che la distanza minima determinata dalle formule precedenti, è uguale a 8,71 metri tra gli assi dei tracker.

Il calcolo del LER è stato effettuato utilizzando la seguente Equazione:

$$LER = \frac{Y_{C-PV}}{Y_C} + \frac{Y_{PV-C}}{Y_{PV}} - \frac{Y_{SPV}}{Y_{PV}}$$

Equazione 12

Tabella 4: Definizioni per il LER

Term	Description
LER	Land Equivalent Ratio
Y_{C-PV}	Yield of olive cultivation in agrivoltaic system
Y_C	Yield of monoculture olive cultivation
Y_{PV-C}	Yield of the PV in agrovoltaic system (excluding shading)
Y_{PV}	Yield of PV system (excluding shading)
Y_{SPV}	Loss in yield due to shading from trees in the agrovoltaic system

Il LER si utilizza per calcolare l'efficienza nell'uso del suolo per un sistema a un solo indirizzo produttivo (es. solo agricolo o solo elettrico nel caso di fotovoltaici montati a terra) rispetto a un sistema combinato così come può essere il sistema agrivoltaico. In questa formula si tiene quindi conto dell'efficienza e dei rendimenti di un sistema agrivoltaico rispetto alla coltivazione olivicola monocolturale. Inoltre, sottrae il termine che rappresenta la perdita di rendimento dovuta all'ombreggiamento causato dagli alberi nel sistema agrivoltaico. Il LER indica, quindi, quanta superficie sarebbe necessaria se si utilizzasse una coltivazione tradizionale per raggiungere la stessa produttività che si ha combinando la coltivazione e l'energia fotovoltaica nel sistema agrivoltaico, considerando anche gli effetti dell'ombreggiamento.

Per quanto riguarda il rendimento ottimale per un campo coltivato esclusivamente con olivi, abbiamo considerato una coltivazione intensiva con 700 olivi per ettaro.

4. Risultati e Discussione

4.1. Variazione dell'angolo di inclinazione β nei vari scenari

La metodologia descritta permette di tracciare quotidianamente le posizioni dei moduli e l'irraggiamento incidente basandosi sulla geometria delle colture nei vari scenari e sulla conoscenza dei giorni giuliani rappresentativi per ogni mese e dei corrispondenti dati sull'irraggiamento solare (Tabella 1). Nella Figura 9, confrontiamo le strategie di inseguimento solare per gli scenari con distanze di $d = 8$ Figura 9(a), $d = 10.6$ nella Figura 9(b) e $d = 12$ nella Figura 9(c), per un tipico giorno di marzo. Per tutte queste distanze, analizziamo l'angolo di inclinazione del pannello in due condizioni: senza alberi ostruttivi ($h = 0$) e in presenza di alberi con altezze $h = 2,3$, $h = 2,6$ e $h = 3$.

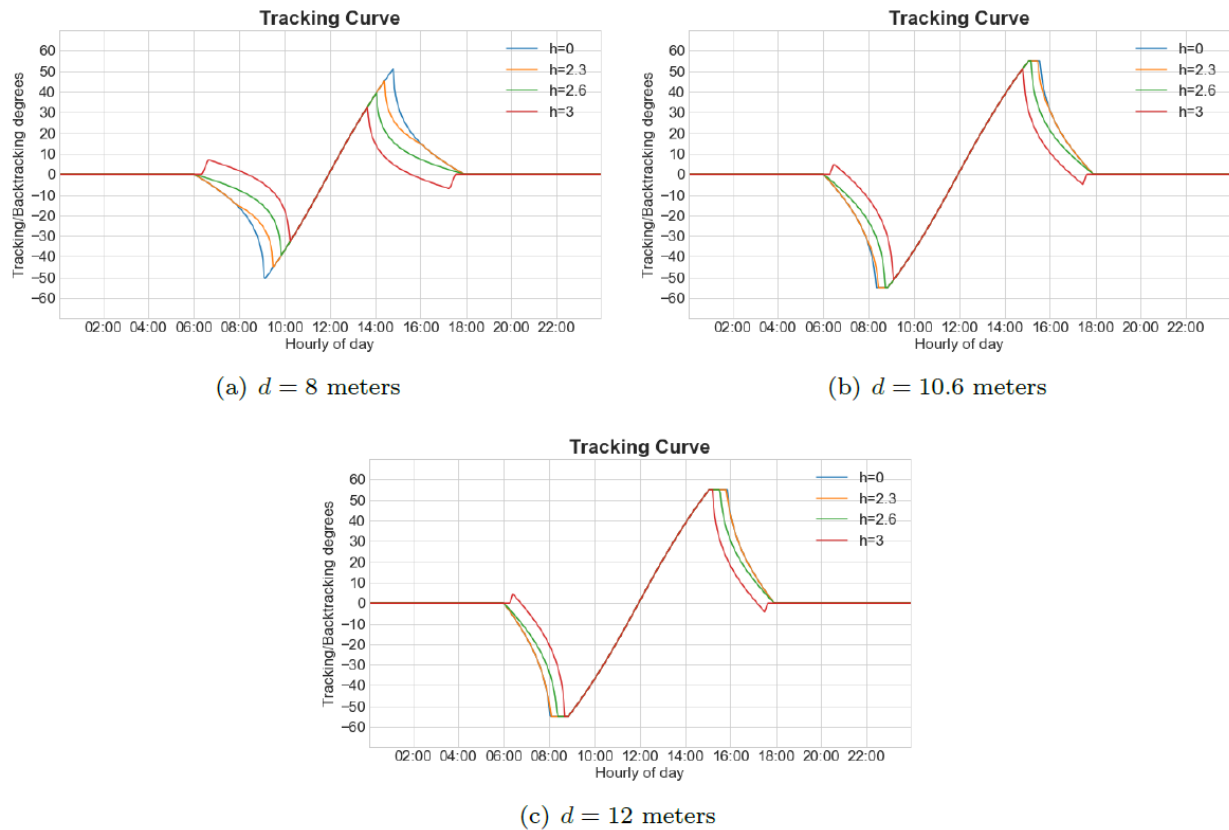


Figura 9: Cambiamento dell'angolo di inclinazione β dei moduli per quattro diverse altezze di coltivazione e per le 3 distanze considerate.

I grafici ci consentono di osservare:

- **Effetto dell'altezza delle siepi interfilari:**
 - Le siepi o ostruzioni più alte di 2.3m possono ritardare il movimento quotidiano dei pannelli ad inseguimento solare. Questo ritardo fa sì che il movimento inizi più tardi e termini prima.
- **Dinamica del tracciamento solare:**
 - Quando ci sono ostruzioni, il movimento di tracciamento inizia con un angolo β inclinato verso l'alto; questa inclinazione serve a evitare l'esposizione diretta alla luce solare e a ridurre gli effetti dell'ombreggiamento parziale.
 - Alla fine della giornata, il movimento tende a inclinarsi verso il basso, oppure si mantiene in una posizione fissa in attesa del giorno successivo.
- **Influenza della distanza interasse:**

- La distanza interasse di 8 metri (Figura 10a) mostra una variazione significativa rispetto alle altre configurazioni. In questa disposizione, i pannelli ricevono meno luce diretta durante il giorno, il che significa che l'irraggiamento diretto è notevolmente ridotto.
- Le distanze 10.60m e 12 m mostrano comportamenti di tracciamento simili. A 12 m si osserva, tuttavia, un meccanismo di inseguimento solare con la maggiore efficienza energetica.

4.2. LER

Il calcolo preliminare dell'angolo di inseguimento e retro-inseguimento e il calcolo dell'irraggiamento solare sui pannelli fotovoltaici permette di calcolare il valore del LER in ogni situazione, tenendo conto del fattore ombreggiamento, come riportato nella Tabella 5.

Tabella 5: Valori di LER in base alla distanza dei tracker e all'altezza degli ulivi

Tracker Distance	Olive Tree Height, h_c	LER Value
$d = 8 \text{ m}$	2.3 m	1.6133
	2.6 m	1.5884
	3 m	1.5596
$d = 10.6 \text{ m}$	2.3 m	1.3959
	2.6 m	1.3834
	3 m	1.3594
$d = 12 \text{ m}$	2.3 m	1.2336
	2.6 m	1.2245
	3 m	1.2044

Dai risultati emerge che:

- **LER e distanza interasse:**
 - Il valore del LER tende ad aumentare quando la distanza tra gli assi del tracker è minore. Questo incremento è particolarmente evidente quando la distanza è di 8 metri. Tale aumento è motivato dal fatto che un maggior numero di alberi si traduce in una maggiore resa di raccolto. Allo stesso modo, più file di pannelli fotovoltaici porta a un accumulo di energia superiore.
 - Con distanze di 10,6 m e 12 m, i valori del LER superano regolarmente l'unità. Questo evidenzia i benefici di un sistema integrato che combina fotovoltaico e coltivazione degli ulivi.
 - Le differenze tra le due distanze citate non sono particolarmente marcate, ma con 12 m si ha un LER leggermente inferiore.

- **Compromessi e considerazioni:**

- La strategia che prevede una minore distanza interasse comporta un maggiore ombreggiamento che si traduce in una minore resa agricola ed energetica.
- A distanze minori, l'angolo di inclinazione massimo del tracker non viene raggiunto, diminuendo l'irraggiamento diretto.

- **Migliore Configurazione:**

- La distanza ideale tra i pannelli per ottimizzare il LER sembra essere di 8 metri. Tuttavia, questa distanza presenta problemi di ombreggiamento sui pannelli poiché è inferiore ai 8,71 metri necessari per evitare interferenze e porterebbe, peraltro, ad un maggiore ombreggiamento sulle colture con effetti sulla produttività da valutare e investigare (vedi relazione "*Ottimizzazione dell'agrivoltaico con oliveti a siepe: analisi modellistica microclimatica*").
- Pertanto, le distanze ottimali sono 10,6 m e 12m poiché offrono un buon compromesso tra LER elevato e minori problemi di ombreggiamento.

La Figura 10, tenendo conto del grado di ostruzione in base ai modelli di irraggiamento, mostra l'evoluzione annuale prendendo come riferimento 12 giorni rappresentativi al mese. Si evidenzia che le differenze nell'irraggiamento incidente sui moduli sono maggiori in estate rispetto ai mesi invernali. **L'irraggiamento maggiore si ha per siepi con $h=2.3m$ e negli scenari con interasse 10.60m – 12m** (quest'ultimo con i valori migliori).

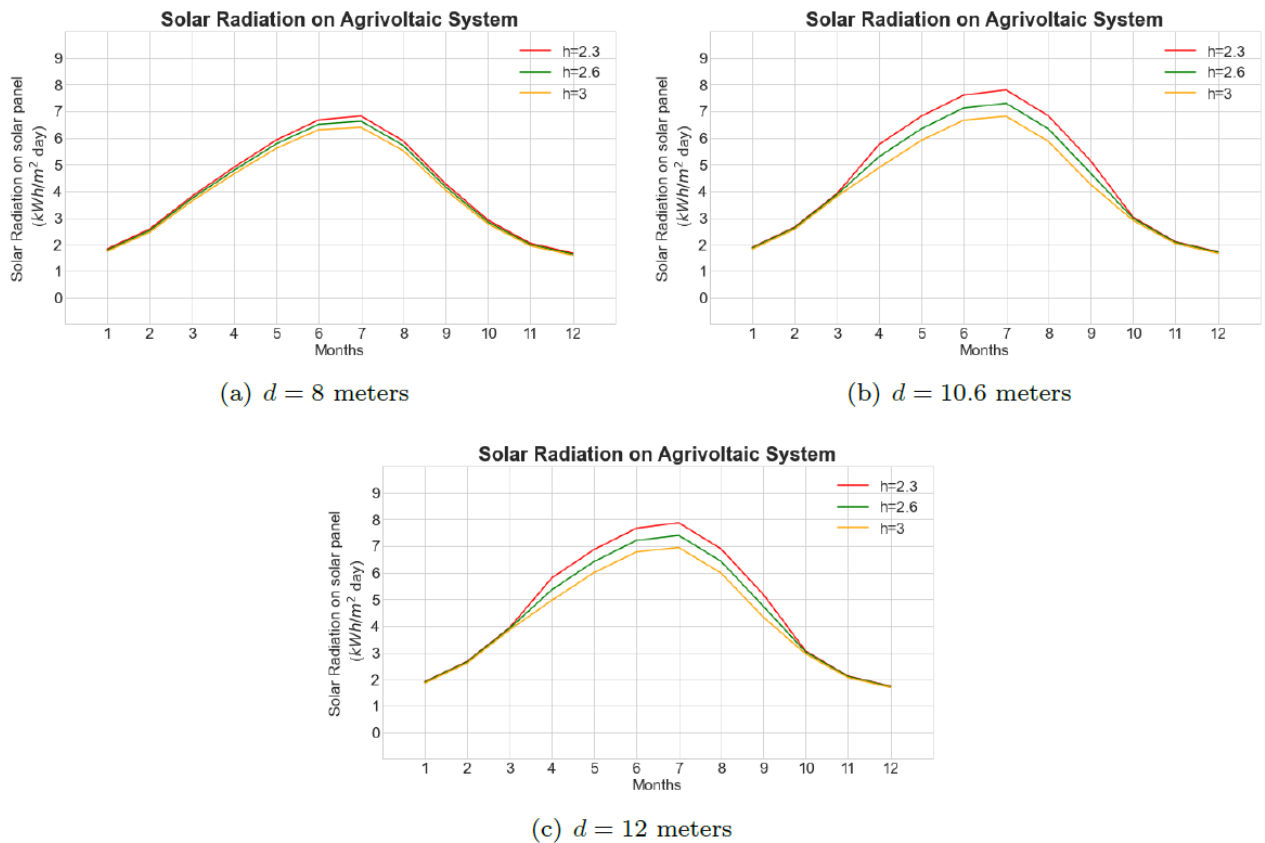


Figura 10: Irraggiamento solare sui pannelli fotovoltaici: (a) Caso $d = 8$ metri, (b) Caso $d = 10,6$ metri, (c) Caso $d = 12$ metri

5. Conclusioni

Il sistema agrivoltaico presenta importanti vantaggi dal punto di vista agricolo, economico ed energetico e rappresenta, perciò, un'innovazione cruciale nel panorama delle energie rinnovabili e dell'agricoltura sostenibile. Tuttavia, richiede una profonda comprensione e integrazione tra discipline diverse per essere implementato con successo.

L'analisi riportata in questo elaborato tecnico scientifico (che sarà sottoposta a pubblicazione su una rivista scientifica internazionale *peer-reviewed*) ha l'obiettivo specifico di definire un layout ottimale per l'impianto "Masserie salentine", in località Monteruga (Nardò, Veglie, Salice Salentino, provincia di Lecce, Puglia) e fornisce metodologie e indicazioni chiave per massimizzare la sinergia tra agricoltura e produzione fotovoltaica.

Nello specifico, è stato condotto uno studio di simulazione approfondito sul possibile **ombreggiamento delle colture sui pannelli fotovoltaici**. Lo studio condotto ha identificato lo spazio

geometrico in cui le colture possono crescere senza causare ombreggiamento sui pannelli, garantendo così la produzione energetica dell'impianto. Tra le varie configurazioni analizzate, sono state determinate la distanza interasse e l'altezza delle colture più appropriate. L'analisi ha inoltre esaminato come la variazione della distanza interasse influisca sul meccanismo di inseguimento solare dei tracker monoassiali e sul conseguente irraggiamento captato dal modulo fotovoltaico.

L'approfondimento microclimatico inserito nella relazione "*Ottimizzazione dell'agrivoltaico con oliveti a siepe: analisi modellistica microclimatica*" esamina gli stessi scenari, fornendo ulteriori dettagli sulla progettazione del layout, con particolare attenzione agli aspetti legati al microclima, al comfort termico e all'attuazione degli obiettivi di sviluppo sostenibile che il progetto si prefigge. I dati derivanti da monitoraggi effettivi sul campo saranno cruciali per confermare e validare i risultati ottenuti tramite simulazione numerico matematica.

In sintesi, l'approccio seguito permette di sfruttare al meglio le potenzialità del sistema agrivoltaico progettato e di garantire i vantaggi previsti sia dal punto di vista agricolo che energetico.

6. Bibliografia

Barbòn A, Carreira-Fontao V, Bay on L, and Silva C. Optimal design and cost analysis of single-axis tracking photovoltaic power plants. *Renewable Energy* 2023;211.

Duffie J and Beckman W. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2006. doi: 10 . 1002 / 9781118671603.

Anderson K and Mikofski M. Slope-Aware Backtracking for Single-Axis Trackers Slope-Aware Backtracking for Single-Axis Trackers. 2020.

Casares de la Torre F, Varo-Martínez M, López-Luque R, Ramírez-Faz J, and Fern andez-Ahumada L. Design and analysis of a tracking / backtracking strategy for PV plants with horizontal trackers after their conversion to agrivoltaic plants. *Renewable Energy* 2022;187.

Spencer JW. Fourier series representation of the position of the sun. *Search* 1971.

Klein S. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar Energy* 1977;19:3259

Pigueiras E and Narvarte L. Tracking and back-tracking. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2011;19:747–53.

Fernaandez-Ahumada L, Ramírez-Faz J, López-Luque R, Varo-Martínez M, Moreno-García I, and Casares de la Torre F. A novel backtracking approach for two-axis solar PV tracking plants. *Renewable Energy* 2020;145:1214–21.

Fern andez-Ahumada L, Ramírez-Faz J, López-Luque R, Varo-Martínez M, Moreno-García I, and Casares de la Torre F. Influence of the design variables of photovoltaic plants with two-axis solar tracking on the optimization of the tracking and backtracking trajectory. *Solar Energy* 2020;208:89–100.

Liu BY and Jordan RC. The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors: With design data for the U.S., its outlying possessions and Canada. *Solar Energy* 1963;7:53–74.

Hay JE. Calculating solar radiation for inclined surfaces: Practical approaches. *Renewable Energy* 1993;3. Solar radiation, environment and climate change:373–80.

Perez R, Ineichen P, Seals R, Michalsky J, and Stewart R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy* 1990;44:271–89.

Mehler E, Zervas P, Sarimveis H, Palyvos J, and Markatos N. Determination of the optimal tilt angle and orientation for solar photovoltaic arrays. *Renewable Energy* 2010;35:2468–75.

Makhdoomi S and Askarzadeh A. Impact of solar tracker and energy storage system on sizing of hybrid energy systems: A comparison between diesel/PV/PHS and diesel/PV/FC. *Energy* 2021;231:120920.

Zhu Y, Liu J, and Yang X. Design and performance analysis of a solar tracking system with a novel single-axis tracking structure to maximize energy collection. *Applied Energy* 2020;264:114647.

Conceicao R, Silva HG, Fialho L, Lopes FM, and Collares-Pereira M. PV system design with the effect of soiling on the optimum tilt angle. *Renewable Energy* 2019;133:787–96.